



**Licenciatura em Física
Instituto de Física - UFRJ**

**PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DE FINAL DE
CURSO**

**A FÍSICA APLICADA NA TRANSMISSÃO E
RECEPÇÃO POR ONDAS DE RÁDIO**

Aluno

Eduardo Pacheco Loureiro

Orientador

João José Fernandes de Sousa

Banca

Lígia de Farias Moreira

Francisco Arthur Braun Chaves

Susana de Souza Barros

Dez 2005



1- Introdução.....	3
2- Propriedades do movimento ondulatório.....	6
2.1- A onda sonora na frequência do audível.....	9
2.2- A onda eletromagnética na frequência de rádio.....	10
3- O que é uma estação de transmissão?.....	13
3.1- O microfone.....	15
3.2- O oscilador eletrônico.....	21
3.2.1- Frequência angular própria.....	24
3.3- O amplificador.....	28
3.3.1- A válvula eletrônica.....	28
3.3.2- Os semicondutores.....	34
3.3.3- O transistor.....	36
3.4- O modulador.....	39
3.5- Transmissão em frequência modulada (FM).....	43
4- O resgate da informação: o aparelho receptor.....	44
4.1- O amplificador de radiofrequência e audiofrequência.....	45
4.2- O detetor.....	45
4.3- O alto-falante.....	49
4.3.1- Nível de intensidade β	51
5- Conclusão.....	53
6- Bibliografia.....	54

1 - Introdução

A humanidade ao longo dos três últimos séculos sofreu muitas transformações tecnológicas, dentre elas o desenvolvimento da máquina térmica, do motor elétrico e à combustão, da eletrodinâmica, das telecomunicações, entre outras, as quais modificaram sensivelmente hábitos e costumes. Porém, mesmo com tantos avanços tecnológicos, observa-se ainda nos tempos atuais que a maioria dos cidadãos não consegue relacionar a teoria ensinada em sala de aula com a tecnologia usada nos equipamentos e tampouco explicar o seu funcionamento. Como a maioria das revoluções tecnológicas baseia-se em descobertas científicas feitas por físicos, um professor de física tem a responsabilidade social de instruir seus alunos de forma que compreendam estas transformações e consigam explicar os seus princípios de funcionamento. Através do tema: "A Física aplicada na transmissão e recepção por ondas de rádio" este trabalho procura associar estes dois fatores: conceito físico e tecnologia.

Há diversas formas de telecomunicação, tais como: telefone, televisão, internet, rádio comunicação, correios e etc... Abordaremos somente a tecnologia de rádio, desenvolvida pelo italiano Guglielmo Marconi no fim do século XIX, conhecida como radiodifusão. A radiodifusão utiliza a transmissão de ondas de rádio através de estações transmissoras comerciais, estando a recepção por conta daqueles que possuem equipamentos para captar os programas, músicas e outras informações emitidas. Cientistas e técnicos de muitos países contribuíram para o desenvolvimento da radiodifusão com seus estudos sobre eletromagnetismo a partir do final do século XIX. Na época já existiam dois meios de comunicação rápida a longas distâncias: o telégrafo e o telefone que enviavam sinais através de fios.

Observando a figura 1 percebemos que a comunicação é um processo pelo qual uma informação gerada em um ponto no espaço e no tempo chamado fonte é transferida a outro ponto no espaço e no tempo chamado de destino. A telecomunicação é uma forma de ampliar o alcance normal da comunicação (tele em grego significa a distância) através da transmissão, emissão ou recepção, por fio, radioeletricidade, meios ópticos ou qualquer

outro processo eletromagnético de símbolos, caracteres, sinais, imagens, sons ou informação de qualquer natureza.

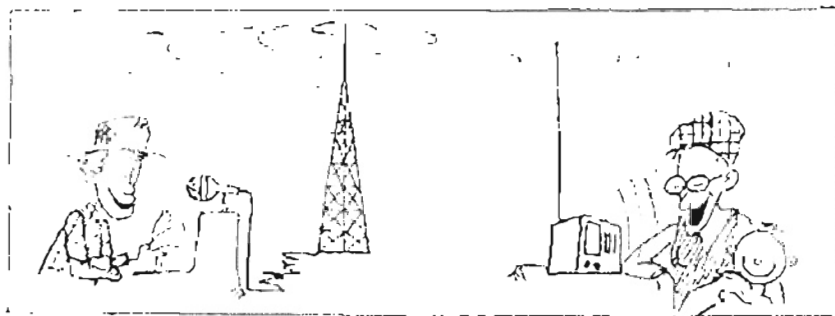


Fig. 1 – Emissão e recepção das ondas de radiodifusão (GREF 3, 2000)

Quando o ouvinte da informação está próximo da fonte (relator, cantor, declamador) a transmissão é direta e imediata, tal como se processa a conversa entre duas pessoas num mesmo ambiente. Quando a distância entre elas aumenta o processo de comunicação direta se torna mais difícil, pois o meio de propagação de uma onda sonora não é homogêneo, gerando por conseguinte refrações e reflexões. Como resultado a energia dissipa-se rapidamente durante a propagação. A evolução da ciência caminhou para o desenvolvimento de um sistema formado por um conjunto de meios e dispositivos que permitiu a fonte e destino se comunicarem à distância. São esses meios e dispositivos que iremos estudar para compreender todo processo envolvido na radiodifusão e o seu princípio de funcionamento.

Um sistema de geração e recepção de ondas de rádio opera basicamente da seguinte forma:

- 1º) uma pessoa ao falar gera ondas sonoras em suas cordas vocais;
- 2º) a onda sonora produz variação de pressão do ar que atinge o microfone;
- 3º) o microfone converte a energia mecânica das ondas sonoras em energia elétrica alternada de baixa frequência conhecida como *audiofrequência*;
- 4º) a estação transmissora gera uma corrente elétrica de alta frequência conhecida como *radiofrequência*. É através do sinal da radiofrequência que identificamos as diversas emissoras de rádio;
- 5º) o sinal de audiofrequência tem por finalidade causar alterações no sinal de radiofrequência, combinando-se de tal forma que esta última atua como veículo transportador do som, gerando um terceiro sinal elétrico conhecido como *onda modulada em amplitude ou frequência*;

6º) essa onda modulada se estabelece na antena da estação transmissora, propagando-se pela atmosfera em todas as direções;

7º) quando uma pessoa sintoniza um aparelho de rádio, essa onda modulada é decodificada e o som é reproduzido pelo alto-falante na mesma frequência da onda sonora que excitou o microfone.

Essa forma de processar a comunicação possibilitou aumentar o alcance da transmissão do som e outras informações. Há certas emissoras de grande potência que alcançam distância de 500 Km, permitindo que sozinha cubra todo território de muitos países.

Devido à sua complexidade, muitas dúvidas surgem naturalmente quando buscamos compreender o funcionamento das telecomunicações, tais como:

1ª) Por que a estação é indicada através de um valor de frequência?

2ª) Por onde são recebidas as informações?

3ª) Que tipo de associação há entre o ajuste do botão de sintonia e o circuito elétrico do rádio?

4ª) Se as várias estações transmissoras emitem informações concomitantemente, como é feita a sintonia de uma delas de cada vez?

No desenvolvimento deste trabalho tais dúvidas serão respondidas na medida que os vários dispositivos eletrônicos utilizados pelo sistema de radiodifusão forem sendo explicados.

Para a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos na transmissão e recepção de ondas de rádio é necessário lembrarmos algumas propriedades do movimento ondulatório

Existem duas grandes classes para os fenômenos do movimento: a emissão de partículas e a deformação dos meios contínuos. Como analogia podemos citar que há duas formas de entrarmos em contato com um amigo que reside em uma cidade distante: através de uma carta ou por telefone. A carta se enquadra no conceito de partícula, pois se move de um ponto ao outro conduzindo informação e energia; já o telefonema se enquadra no conceito de deformação dos meios contínuos, pois a informação e energia se deslocam de um ponto ao outro sem que qualquer objeto material se desloque.

O movimento ondulatório estuda a natureza das ondas, designando a transferências de energia de uma fonte para um sensor distante sem a transferência de matéria entre os dois pontos. O termo genérico onda é usado no movimento ondulatório para designar um distúrbio que se propaga em um meio sem o deslocamento permanente como um todo desse meio. De acordo com a sua natureza as ondas são classificadas em mecânicas ou eletromagnéticas.

Quando uma onda mecânica se propaga através de um meio material, como a onda sonora, ela necessariamente força as partículas do meio ao movimento de oscilação. Para que isso ocorra, entram em jogo as propriedades da inércia, de forma a permitir o armazenamento de energia cinética e da elasticidade, para que a energia potencial possa ser acumulada. A inércia está relacionada com os elementos do meio e a elasticidade com as tensões de ligação dos elementos do meio. Por causa destas duas propriedades, uma onda mecânica propaga-se pelo espaço transmitindo energia sem transportar matéria.

Uma onda eletromagnética na frequência de rádio é gerada por um circuito oscilador eletrônico e se origina da oscilação de cargas elétricas entre um capacitor e uma bobina. Devido a sua natureza eletromagnética não necessita de um meio composto de matéria para se propagar, podendo

deslocar-se livremente a longas distâncias mesmo no espaço vazio transmitindo energia e informação, como, por exemplo, a luz das estrelas.

Toda onda, seja ela eletromagnética ou mecânica, pode ser descrita usando um conjunto de grandezas físicas principal: amplitude, comprimento de onda, período, frequência e frequência angular.

A amplitude de uma onda é a medida da magnitude de um distúrbio em um meio durante um ciclo de onda. Por exemplo, ondas em uma corda têm sua amplitude expressa como uma distância, de um ponto em relação ao equilíbrio; as amplitudes das ondas sonoras expressam uma variação de pressão em relação à pressão atmosférica e ondas eletromagnéticas têm sua amplitude expressa como a intensidade máxima de campo elétrico e de campo magnético em relação ao equilíbrio.

A amplitude pode ser controlada para variar com o tempo. As variações de amplitude com o tempo são a base para modulação em amplitude (AM), assunto que será estudado ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A unidade do Sistema Internacional utilizada para a medida da amplitude depende do tipo de onda. Em uma onda numa corda a unidade é o metro (m). No caso das ondas sonoras e sinais de áudio a amplitude é expressa em decibéis (dB), assunto que será abordado quando falarmos do alto-falante.

O comprimento de onda é designado pela letra grega lambda λ e corresponde a um ciclo completo do movimento periódico. Essa grandeza determina o comprimento físico de uma antena. Ela está relacionada com a frequência através da equação: $v = \lambda \cdot f$, onde v é a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no espaço. Através dessa equação podemos verificar que enquanto uma onda eletromagnética se desloca com velocidade constante, quanto maior for o valor da frequência, menor será o valor do comprimento de onda e menor será a altura de uma antena de transmissão. A unidade no Sistema Internacional é o metro (m).

O período T é o tempo de um ciclo completo de uma oscilação de uma onda. Pode ser considerado também como o intervalo de tempo que demora para um fenômeno se repetir. Como exemplo, podemos citar o próprio dia, que é o período de tempo para a Terra girar em torno de si mesma ao redor de um eixo imaginário que a atravessa de um polo ao outro. A Terra leva 24 horas para completar essa rotação, ou seja, $T = 8,64 \times 10^4$ s. A unidade no Sistema Internacional é o segundo (s).

repetição de qualquer fenómeno periódico. Define-se como o número de vezes que um fenómeno se repete na unidade de tempo. A frequência de um movimento periódico está relacionada com o período através da expressão: $f = 1 / T$.

É através dessa grandeza física que identificamos os sinais das várias estações transmissoras que se encontram no espaço e percebemos a altura e o timbre de um som reproduzido por um alto-falante.

A altura é uma qualidade do som que nos permite distinguir se um som é agudo ou grave. Quanto maior for a frequência, maior é a altura e mais agudo é o som; quanto menor for a frequência, menor é a altura e mais grave é o som.

É importante não confundir a altura de um som com o volume sonoro. O volume sonoro está associado à amplitude da onda. Quanto maior a amplitude, maior é a intensidade sonora que uma onda se propaga.

O timbre é uma qualidade do som que nos permite distinguir sons de uma mesma frequência. Por exemplo, quando duas pessoas estão falando em um rádio percebemos as duas vozes ou quando um piano e um violão estão tocando a mesma nota.

Quando uma onda é expressa na forma de uma função trigonométrica de senos e cossenos a frequência angular ω (letra grega ômega) é uma grandeza física relacionada com a frequência através da expressão: $\omega = 2\pi f$. A frequência angular é a responsável pelo ajuste eletrónico de uma estação transmissora através do fenómeno da ressonância, que será abordado com mais detalhes quando estudarmos o princípio funcionamento do detetor em um radioreceptor.

2.1 – A onda sonora na frequência do audível

Onda sonora é uma classe particular de onda mecânica que se propaga longitudinalmente através do ar, líquido e sólido podendo ser de uma frequência detectada ou não pelo sistema auditivo humano. No caso particular da voz humana, ela resulta da ação das cordas vocais na laringe. Essas cordas ao vibrarem, na faixa de frequência compreendida entre 200 a 10.000 Hz (veja fig. 37 do tópico 4.3.1), forçam as moléculas de ar que começam a vibrar nessa mesma frequência, transmitindo a perturbação para as moléculas vizinhas, as quais transmitem para as posteriores e assim por diante. Surgem, então, duas regiões: uma região de compressão e outra de rarefação. Na região de compressão há uma alta concentração de moléculas, tornando a densidade e a pressão maiores em relação à situação de equilíbrio; na região de rarefação há baixa concentração de moléculas, tornando a densidade e pressão menores em relação à situação de equilíbrio. Essas regiões alternadas de alta e baixa densidade e pressão se deslocam em virtude das colisões entre as moléculas. Os deslocamentos produzem uma variação de pressão em relação à pressão atmosférica que atuam sobre um diafragma flexível no microfone, fazendo vibrar um dispositivo elétrico no microfone na mesma frequência da onda sonora, gerando uma oscilação de baixa frequência conhecida por audiofrequência (AF).

2.2 – A onda eletromagnética na frequência de rádio

A radiação eletromagnética na frequência das ondas de rádio é produzida nas antenas emissoras, cujo funcionamento é baseado na Lei de Ampère que estabelece a criação de um campo magnético a partir de uma corrente elétrica ou pela variação do fluxo de um campo elétrico.

A figura 2 demonstra como um pulso eletromagnético pode ser criado quando é percorrido uma corrente elétrica variável. O sistema é formado por uma antena emissora (duas hastes condutoras) ligada a uma bateria através de uma chave de um polo e uma posição.

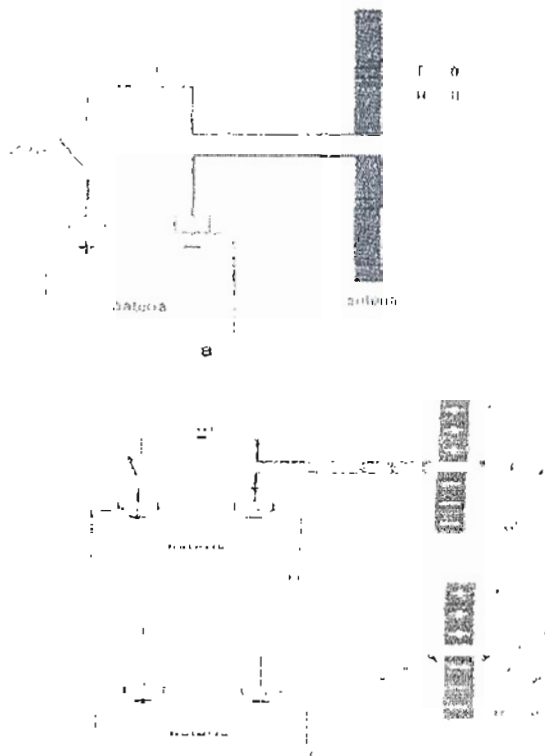


Fig. 2 – Processo de geração de um pulso eletromagnético (Gaspar 3, 2000)

Com a chave aberta não há corrente elétrica fluindo pelo circuito, nem campo elétrico ou magnético nas hastes (fig.- 2.a). Quando a chave é ligada as hastes da antena se carregam como placas de um capacitor, os portadores de carga originários da fonte fluem para as hastes. Aparece, então, um campo elétrico variável crescente que gera um campo magnético variável crescente (fig.- 2.b). Quando o fluxo de portadores de carga cessa, a variação do campo elétrico se anula e o resultado é a produção de um pulso eletromagnético que

se propaga pelo espaço (fig.- 2.c). Se a chave for substituída por um circuito oscilante eletrônico serão produzidas ondas em todas as direções no espaço.

As primeiras ondas de rádio geradas experimentalmente foram produzidas e detectadas por Heinrich Rudolf Hertz em 1888. Físico alemão que estudou em 1883 o trabalho de Maxwell, o qual havia escrito quatro equações básicas do eletromagnetismo e previsto a existência de ondas eletromagnéticas que se propagariam com a velocidade da luz.

1º) Lei de Gauss para o campo elétrico

"O fluxo do campo elétrico através de uma superfície fechada no vácuo é igual à soma das cargas internas à superfície dividida pela permissividade elétrica vácuo".

2º) Lei de Gauss para o campo magnético

"O fluxo do campo magnético através de uma superfície fechada é nulo, pois as linhas de campo magnético não têm origem nem fim".

3º) Lei de Ampère

"Uma corrente elétrica de intensidade (i) e/ou a variação do fluxo do campo elétrico através de uma linha fechada é igual ao fluxo do campo magnético através de uma superfície limitada por essa linha, ou seja, um campo magnético pode ser criado tanto por uma corrente elétrica como pela variação do fluxo de um campo elétrico". Essa lei é aplicada na geração das ondas de rádio em uma antena emissora.

4º) Lei de Faraday

"A variação do fluxo do campo magnético gera um campo elétrico ou uma força eletromotriz induzida na linha fechada que concatena a área cortada pelo fluxo". Essa lei é princípio de funcionamento de uma antena receptora de ondas de rádio.

De um modo geral as frequências do espectro eletromagnético diferem de acordo com a natureza da fonte de radiação. As frequências mais baixas provêm da oscilação de cargas elétricas em fios condutores. É o caso das radiações emitidas por condutores percorridos por corrente alternada, geralmente com frequência de 60 Hz, são elas que produzem um ronco característico quando o rádio do carro, sintonizado em alguma estação em AM,

passa perto dos fios das redes de alta tensão. No intervalo de 10^4 a 10^{10} Hz as fontes são circuitos oscilantes ou transmissores de estação de rádio e televisão. De 10^{10} a 10^{12} Hz estão as microondas geradas por válvulas eletrônicas especiais. De 10^{11} a 4×10^{14} Hz estão as radiações de calor ou infravermelhas geradas pela vibração dos elétrons nas ligações químicas dos átomos ou moléculas. O curto intervalo de 4 a 8×10^{14} Hz corresponde à luz visível até a frequência de 10^{17} Hz estão compreendidas as radiações ultravioletas. Entre 10^{15} e 10^{20} Hz estão os raios x, originados de transições de elétrons mais internos do átomo ou da desaceleração muito rápida de partículas de alta energia carregadas eletricamente. Finalmente de 10^{19} a 10^{24} Hz está o raio gama, originado da transição de partículas em camadas do interior do núcleo atômico.

3 – O que é uma estação de transmissão?

Uma estação de transmissão se compõe de elementos ativos como o microfone, o modulador, o oscilador e amplificadores. Todos integram a emissora, desde o estúdio onde são gerados os programas ao vivo ou em sistemas de reprodução, até chegar ao parque da antena através da linha de transmissão.

A figura 3 ilustra o diagrama em bloco de uma estação de transmissão. A seção de radiofrequência é constituída por um oscilador eletrônico, modulador e amplificador de radiofrequência. A seção de audiofrequência é constituída pelo microfone e por um audio-amplificador. Ela é a responsável por gerar a portadora de alta frequência irradiada pela antena. A seção de audiofrequência é a responsável por gerar um sinal de baixa frequência conhecida como onda moduladora, que irá modificar a amplitude da onda portadora, incorporando a informação a ser divulgada.

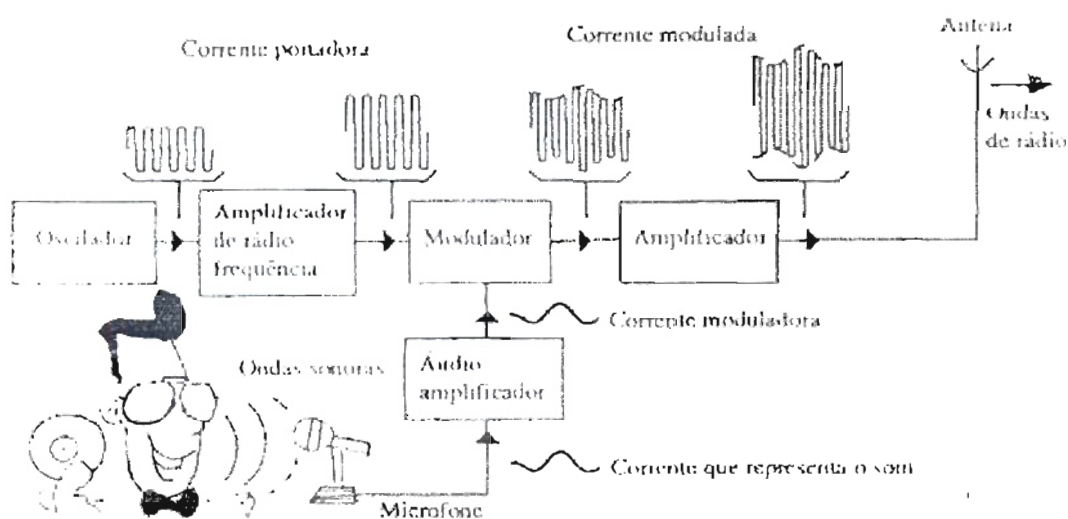


Fig. 3 – Diagrama em bloco de uma estação transmissora (GREF 3, 2000)

Basicamente um radiotransmissor converte sinais sonoros, analógicos ou digitais em ondas eletromagnéticas, enviando-os para o espaço através de uma antena transmissora para serem captados por um radioreceptor.

A tecnologia de transmissão de som por ondas de rádio, foi desenvolvida pelo italiano Guglielmo Marconi no fim do século XIX, que aproveitou a antena criada por Aleksander Popov e a sintonia desenvolvida por Oliver Lodge, a qual permitia selecionar o recebimento de apenas uma frequência específica entre as inúmeras que podem ser captadas por uma antena. Em julho de 1896 Marconi emitiu ondas de rádio e conseguiu captá-los a cem metros. Essa distância ampliou-se, no mesmo ano, para dois quilômetros. Em maio de 1897 para treze quilômetros. No fim do século XX o Atlântico Norte já era cruzado por sinais de radiotelegrafia.

Na mesma época em 1893, no Brasil, um padre chamado Roberto Landell de Moura também buscava resultados semelhantes em experiências feitas em São Paulo.

3.1 - O microfone

Um microfone é um dispositivo que converte o som em sinal elétrico. Ele é usado no telefone, no gravador, em aparelho auditivo, na transmissão de rádio e de televisão, dentre muitas outras aplicações. As ondas sonoras excitam vibrações mecânicas em um diafragma fino e flexível. Essas vibrações mecânicas são por fim convertidas em sinais elétricos.

Existem vários mecanismos para converter as vibrações mecânicas em sinais elétricos. Dependendo do mecanismo, os microfones são classificados como:

- microfone de indução;
- microfone de carvão;
- microfone de capacitor;
- microfone de cristal.

O microfone de indução tem seu princípio de funcionamento baseado na Lei de Indução de Faraday, segundo a qual a variação temporal do fluxo magnético produzido pelo movimento de um ímã permanente ou um eletroímã em relação a uma segunda bobina induz uma força eletromotriz variável nesta bobina.

A figura 4 mostra um microfone de indução com uma bobina sob a ação do campo magnético de um ímã permanente. A variação da pressão do ar movimenta o ímã e este movimento provoca a variação do fluxo magnético que por sua vez induz uma força magnética nos elétrons livres do condutor da bobina conhecida como Força de Lorentz. A força magnética induz uma força eletromotriz variável nas extremidades do condutor da bobina. É justamente esta força eletromotriz variável que atua em um capacitor do sistema de modulação alterando a amplitude ou frequência da onda portadora de radiofrequência.



Fig. 4 - Microfone de indução (GREF 3, 2000)

A Força de Lorentz é uma força de caráter elétrico e magnético que atua sobre uma carga elétrica. "O primeiro relato experimental dessa força data de 1881. É de J.J. Thomson (1856-1940), físico inglês que descobriu o elétron. Nesse trabalho Thomson baseou-se na teoria de Maxwell procurando saber de que forma partículas carregadas eletricamente seriam afetadas pela presença de ímãs. Thomson chegou a uma expressão da força magnética":

$$F = \frac{1}{2} qvB \cdot \sin\theta$$

Onde q é a carga de prova, v é a velocidade da partícula, B é a intensidade do campo magnético e θ é o ângulo formado entre o vetor velocidade e o vetor campo magnético.

Em 1889 outro físico inglês, Oliver Heaviside corrigiu o trabalho de Thomson e apresentou a expressão correta:

$$F = qvB \cdot \sin\theta$$

Mais tarde, em publicações de 1892 e 1895, o físico holandês Hendrik Lorentz apresentou uma expressão mais geral em que inclui também a ação do campo elétrico sobre a partícula carregada, chegando a uma expressão equivalente a:

$$F = qE + qvB \cdot \sin\theta$$

Esta expressão é conhecida como Força de Lorentz" (Gaspar 3, 2000)

O microfone de carvão é o mais antigo de todos. Ele é formado basicamente por um receptáculo contendo pó de carvão e um circuito elétrico que inclui uma fonte de energia elétrica, como é mostrado na figura 5. As variações de pressão do ar atingem um diafragma provocando a compressão que aproxima os grãos do pó de carvão diminuindo a resistência e a descompressão que afasta os grãos do pó de carvão aumentando a resistência elétrica do circuito. Por esta razão a corrente elétrica do circuito varia de intensidade com o mesmo ritmo das alterações da pressão do ar, sendo esta corrente variável que atua no capacitor do sistema de modulação.

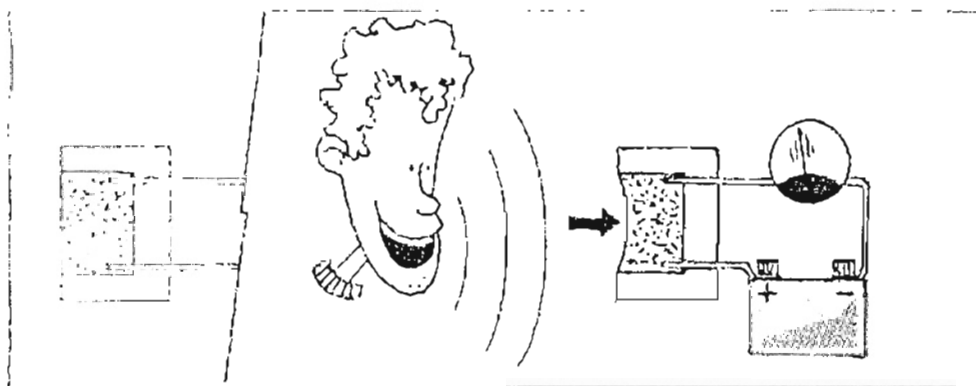


Fig. 5 - Microfone de carvão (GREF 3, 2000)

O microfone de capacitor consiste basicamente de um capacitor e de uma fonte de energia elétrica. Ligadas a esta fonte, as placas do capacitor são carregadas com cargas de sinais opostos, surgindo um campo elétrico entre elas. Quando as variações de pressão do ar provocadas pelo som atingem o capacitor, a distância entre as placas varia alterando o campo elétrico criado por elas. Tais alterações resultam em corrente elétrica alternada que atua no capacitor do sistema de modulação. O esquema deste capacitor está representado na figura 6.

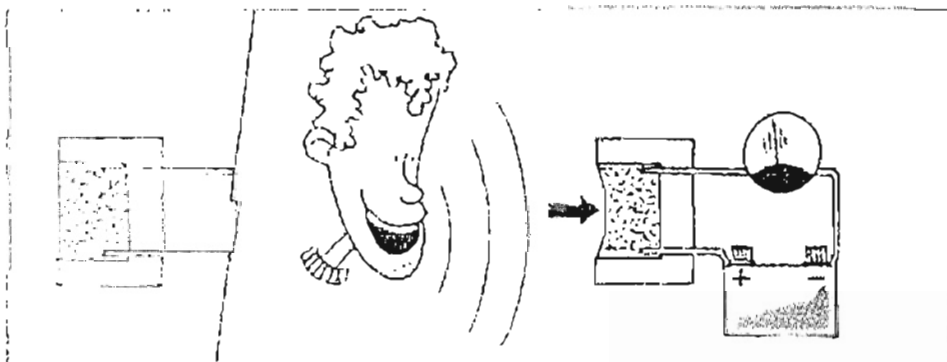


Fig.6 - Microfone de capacitor (GREF 3, 2000)

O microfone de cristal tem seu princípio de funcionamento baseado no efeito piezoelétrico. Este efeito surge quando um cristal de quartzo ou turmalina sofre uma variação de pressão produzindo uma força eletromotriz variável.

A figura 7 mostra o esquema de funcionamento do microfone de cristal. Quando as variações de pressão do ar atingem o cristal, ocorre neste uma separação de cargas induzindo um campo elétrico variável no interior do cristal, este campo elétrico induz uma força eletromotriz que atua no capacitor do sistema de modulação.

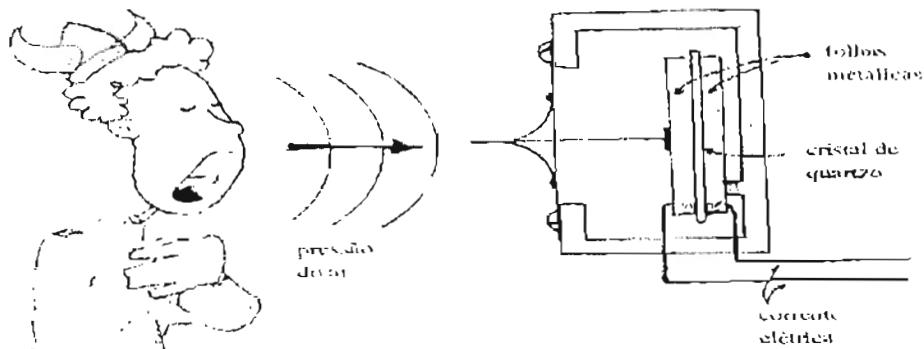


Fig. 7 - Microfone de cristal (GREF 3, 2000)

Independente do tipo de microfone, o princípio de funcionamento básico consiste em transformar variações de pressão do ar que constituem o som em variações de intensidade de corrente elétrica. O microfone transforma a energia das ondas mecânicas do ar em energia elétrica, o qual contém as informações. A figura 8 ilustra como o som é transformado em corrente elétrica alternada em uma estação transmissora. A energia elétrica obtida no microfone é do tipo alternada e de baixa frequência conhecida como audiofrequência.

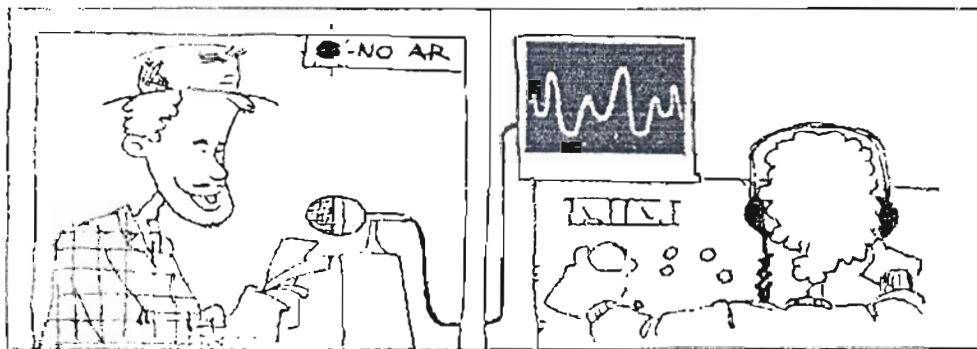


Fig. 8 - Processo de transformação da energia sonora em energia elétrica (GREF 3, 2000)

A oscilação de audiofrequência, também chamada de oscilação modulante e_m , é uma oscilação cossenoidal cuja representação gráfica é mostrada na figura 9.

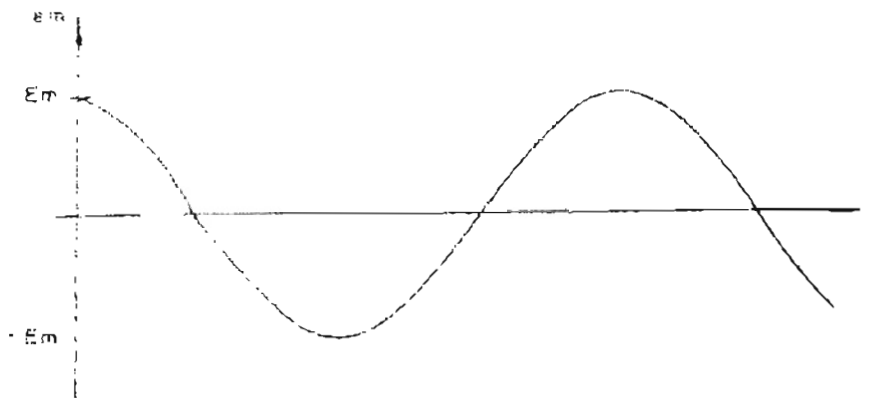


Fig.9 - Representação gráfica da oscilação de audiofrequência (Gomes,2000)

Matematicamente, podemos escrever as vibrações provocadas por esta oscilação em função do tempo da seguinte forma:

$$e_m = E_m \cos \omega_m t$$

Onde ω_m é a frequência angular própria da oscilação de audiofrequência e E_m é a amplitude máxima gerada pelo microfone..

A frequência da onda sonora transformada em frequência elétrica é muito baixa para fins de transmissão direta pela antena, porque o comprimento físico da antena está diretamente associado ao comprimento de onda (λ) do sinal elétrico transmitido, através da expressão:

$$\lambda = c/f$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo e f é a frequência da oscilação de audiofrequência.

Como exemplo, vamos calcular o comprimento de onda mínimo para a faixa de 20 kHz, ou seja, o limite superior audível.

$$\lambda = ?$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$f = 20 \text{ kHz} = 2 \cdot 10^4 \text{ Hz}$$

Logo, pela equação anterior λ é igual a 15 Km, ou seja, a antena deve ter essa dimensão. Por isso é impossível transmitir diretamente o sinal de audiofrequência.

As estações transmissoras utilizam uma segunda onda com frequência maior gerada pelo oscilador, cuja finalidade é somente transportar o sinal de audiofrequência e tornar viável a construção de uma antena transmissora.

Um circuito que permite obter corrente alternada de alta frequência é constituído por uma bobina e por um capacitor ligados conforme é ilustrado na figura 10. Uma bobina constitui-se de um fio condutor enrolado em forma de espiral e um capacitor constituído por duas placas condutoras, separadas por um material isolante. As grandezas físicas em jogo são a indutância (L) e a capacitância (C). A indutância representa a inércia do oscilador enquanto que a capacitância representa a força de restauração sobre as cargas elétricas.



Fig.10 - Representação esquemática de um oscilador eletrônico (GREF 3, 2000)

Para carregar o capacitor é necessária uma fonte de energia elétrica que provoque o movimento dos elétrons livres do fio condutor contra a ação de uma força elétrica entre as placas do capacitor devido ao material isolante. Quando o capacitor está carregado não há movimento de cargas: os elétrons se acumulam em uma das placas, ao mesmo tempo em que há deficiência na outra placa. As placas do capacitor são carregadas uma negativamente e a outra positivamente. A quantidade de cargas que um capacitor acumula depende da tensão da fonte, da área das placas, da distância entre elas e do material isolante que as separa. Ao conectar uma bobina diretamente às placas do capacitor carregado, surge nesse circuito uma corrente elétrica com o movimento dos elétrons acelerados em direção à placa positiva. A intensidade da corrente no circuito aumenta até cessar a força elétrica. Como a corrente elétrica é crescente, o campo magnético criado por ela é variável. De acordo com a Lei de Faraday, a variação deste campo induzirá no circuito, especificamente na bobina, uma força contra-eletromotriz que se oporá ao aumento da corrente. Este fenômeno é conhecido como auto-indução. A partir desse instante, os elétrons livres passarão a carregar as placas do capacitor com cargas de sinal contrário ao da situação anterior, criando no fio um campo

elétrico oposto ao campo inicial.. Segundo a Lei de Faraday-Lenz a variação negativa na corrente da bobina induzirá (auto-indução) uma fem no circuito que manterá o movimento das cargas contra o potencial eletrostático do capacitor até anular a corrente. Neste instante com o capacitor recarregado uma nova corrente elétrica surge no circuito e o processo se repete. Todas as fases do processo são ilustradas na figura 11.

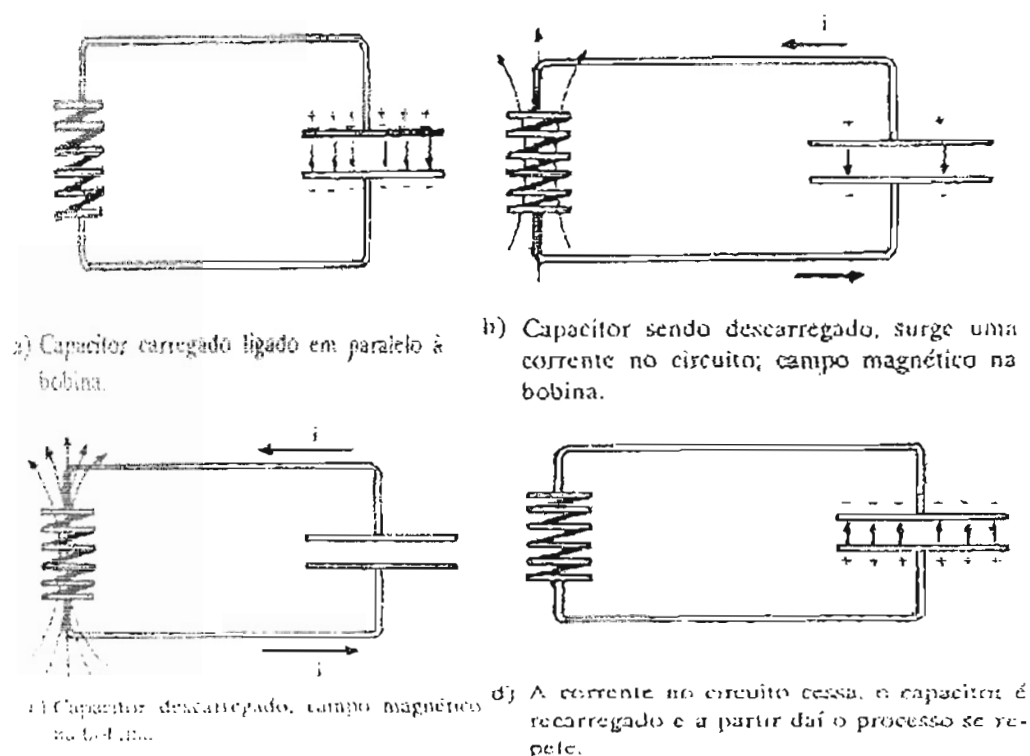


Fig.11- Processo de formação da corrente alternada de alta frequência(GREF 3,2000)

Nesse circuito a bobina desempenha o papel fundamental da inércia do oscilador. Se ela fosse substituída por um fio retilíneo a corrente elétrica mudaria de sentido com tanta rapidez que poderíamos associar a um período de oscilação quase nulo (frequência infinita) e o processo de descarga seria percebido como um curto-circuito. A bobina tem por função carregar e descarregar um campo magnético e quanto maior for a indutância maior será o período de oscilação.

Do processo de carga e descarga do capacitor resulta uma corrente elétrica alternada que gera uma frequência angular característica. A frequência angular desta corrente dependerá da capacidade do capacitor de acumular

cargas e também da capacidade de auto-indução da bobina. Estas propriedades do capacitor e da bobina são denominadas, respectivamente, capacitância e indutância e dependem fundamentalmente de suas dimensões geométricas. No que se refere ao capacitor, quanto maior sua capacidade de acumular cargas, maior é o tempo ou período necessário para descarregá-lo e carregá-lo. Quanto a bobina, quanto maior a sua capacidade de auto-indução, maior será sua capacidade de armazenar energia magnética e maior será o tempo ou período em que a corrente permanecerá num certo sentido e menor a variação de sua intensidade.

Com um circuito desse tipo podemos obter uma corrente alternada de qualquer frequência angular, basta projetar adequadamente a capacitância e a indutância. Isto é feito pelas estações transmissoras de ondas de rádio, a fim de que cada uma opere dentro da sua faixa de frequência.

3.2.1 - Frequência angular própria

Para a compreensão desse conceito, a analogia com um oscilador mecânico do tipo massa-mola é útil, pois a oscilação resulta da oposição entre força de restauração e inércia para qualquer oscilador físico. A figura 12 compara o funcionamento do oscilador eletrônico com o oscilador mecânico.



Fig.12 - Analogia entre o oscilador eletrônico e o oscilador mecânico (Gaspar 3, 2000)

Na figura a, a mola está comprimida pelo bloco A, o que equivale no circuito abaixo ao capacitor carregado. O bloco tende a se deslocar porque a mola tem energia potencial elástica, da mesma forma que a carga elétrica tende a se mover porque o capacitor tem energia potencial elétrica (força de restauração).

Na figura b, a mola está no seu comprimento normal de repouso, portanto sem energia potencial elástica, da mesma forma o capacitor está descarregado, sem energia potencial elétrica. Mas o bloco adquiriu energia cinética por causa da sua velocidade (v), da mesma forma, há uma corrente elétrica induzida na bobina, que lhe confere energia devida ao campo magnético armazenado na bobina. É essa energia cinética do bloco e magnética na bobina que faz com que o processo continue. O bloco avança

contra a mola e os elétrons prosseguem os seus movimento contra o capacitor (propriedade de inércia).

Através dessa analogia, vemos que um capacitor desempenha um papel semelhante a uma mola (força de restauração) e a bobina atua como massa inercial (resiste à mudança de estado de movimento); portanto, suas grandezas podem ser comparadas para encontrarmos uma relação matemática que expresse a frequência angular de um oscilador eletrônico.

A frequência angular própria do oscilador massa-mola é expressa por:

$$\omega = (k/m)^{1/2}$$

A constante elástica da mola k é matematicamente equivalente a constante dielétrica do capacitor $1/C$, pois ambas são responsáveis pelo armazenamento da energia potencial. A indutância L é matematicamente equivalente a massa inercial m , pois ambas são responsáveis pela energia do movimento. A frequência angular própria do oscilador eletrônico é expressa por:

$$\omega = 1/(LC)^{1/2}$$

Qual o significado concreto da frequência angular? Para compreendermos, note que o oscilador massa-mola executa um movimento harmônico simples e este movimento pode ser comparado com o movimento circular uniforme. Observe a figura 13, enquanto o ponto P se desloca em torno da circunferência em movimento circular uniforme, o ponto Q se desloca ao longo do diâmetro em movimento harmônico simples. Observe que o ponto Q pode se considerado como a projeção do ponto P ao longo do diâmetro da circunferência. A frequência angular de um oscilador representa a velocidade angular de um arco em movimento circular uniforme. A frequência angular é expressa no SI em radiano por segundo (rad/s). O valor do arco é um número adimensional embora sua unidade seja "um radiano".

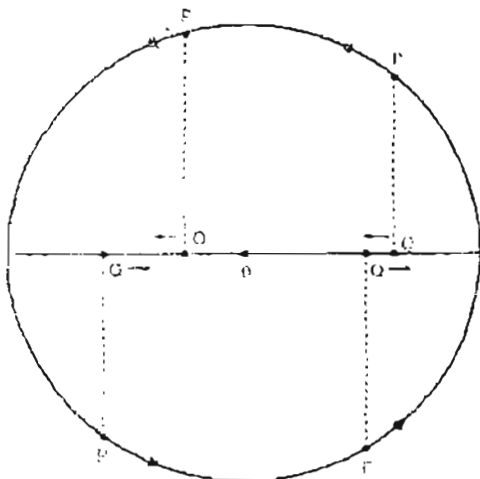


Fig.13 - Ilustra como um movimento harmônico simples pode ser comparado com o movimento circular uniforme (Gaspar 2, 2000)

A relação entre frequência (f) e frequência angular (ω) no movimento harmônico simples é a mesma que entre frequência e velocidade angular no movimento circular uniforme.

$$\omega = 2\pi f$$

A frequência (f) gera uma oscilação senoidal de alta frequência conhecida como oscilação portadora e_0 irradiada pela estação transmissora. A figura 14 representa graficamente esta onda.

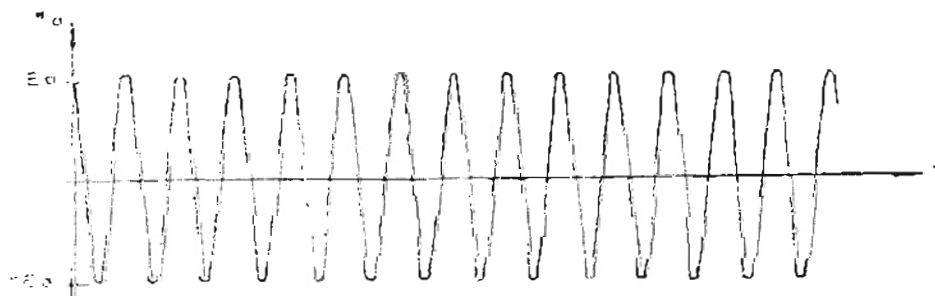


Fig. 14 - Ilustração gráfica da onda portadora de radiofrequência e_0 (Gomes, 2000)

Matematicamente, podemos escrever esta oscilação em função do tempo como:

$$e_0 = E_0 \cos \omega_0 t$$

Unde ω_0 e a frequência angular do oscilador eletrônico e ε_0 e a amplitude máxima de energia fornecida pela estação transmissora. É essa frequência, expressa em seus múltiplos kHz ou MHz, que identificamos uma estação transmissora de rádio.

3.3 - O amplificador

O audio-amplificador, o amplificador de radiofrequência e o amplificador são diferentes estágios que possuem a função de amplificar um sinal de baixa intensidade, isto é, aumentar sua amplitude. Os amplificadores mais antigos utilizavam válvulas eletrônicas, já os mais modernos utilizam transistores.

3.3.1 – A válvula eletrônica

Com a invenção da válvula termoiônica foi possível melhorar a transmissão e a reprodução do sinal de rádio. Começaram as emissões radiofônicas com qualidade. Em 1908, Lee De Forest realizou, do alto da Torre Eiffel, uma emissão ouvida nos postos militares da região de Marselha. Um ano depois, a voz do tenor Enrico Caruso era transmitida do Metropolitan Opera House. Em 1916, De Forest instalou uma estação emissora experimental em Nova York. No final da Primeira Guerra Mundial, a radiofonia estava em pleno funcionamento no mundo inteiro.

A válvula eletrônica dependendo do seu emprego pode ser classificada em: válvula diodo ou triodo. A válvula diodo é um bulbo de vidro que contém gases inertes à baixa pressão, um filamento e uma placa metálica perto deste filamento. A figura 15 ilustra uma válvula diodo.

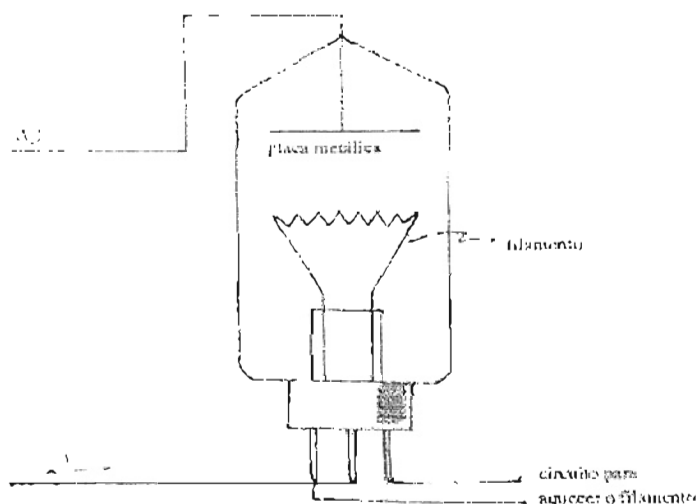


Fig. 15 - Válvula diodo padrão (GREF 3, 2000)

Quando uma válvula diodo é ligada aos terminais de uma fonte de corrente alternada, obtemos uma corrente contínua pulsante. Isso ocorre porque a válvula interrompe o circuito para a corrente em um sentido e permite para o sentido oposto. Os terminais da fonte de corrente a ser retificada são ligados à placa metálica e ao filamento, porém para seu funcionamento, a válvula precisa estar quente. Por isso, para esquentar o filamento, seus terminais são ligados a uma outra fonte de energia elétrica, independente daquela cuja corrente será retificada.

Para compreender o seu funcionamento, vamos considerar um determinado instante em que o ciclo positivo da corrente alternada polariza a válvula e depois analisar o que acontece durante o ciclo negativo. A figura 16 mostra o momento em que o ciclo positivo da corrente alternada polariza a válvula diodo.

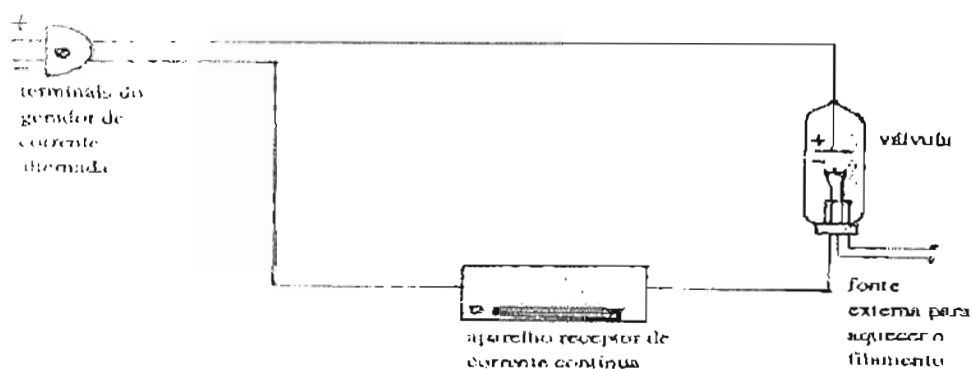


Fig.16 - Esquema de ligação quando a válvula diodo permite a passagem de corrente elétrica (GREF 3, 2000)

Nesta situação, o campo elétrico estabelecido no fio faz surgir na placa metálica cargas elétricas positivas. Tais cargas atraem os elétrons que ao se movimentarem fecham o circuito elétrico. Uma vez que não há nenhum material condutor entre o filamento incandescente e a placa metálica, qual a origem destes elétrons?

Através da física do estado sólido, sabe-se que um metal possui uma estrutura cristalina com bandas deslocalizadas onde em sua última camada há um número muito grande de elétrons livres. O aumento de temperatura do filamento da válvula provoca um acréscimo de energia cinética dos elétrons livres. À medida que a temperatura aumenta, os elétrons vão adquirindo

energia cinética suficiente para se desprenderem do filamento, em resposta ao potencial elétrico aplicado entre os terminais do diodo. Esse fenômeno é denominado emissão termoiônica.

Os elétrons liberados pelo filamento aquecido sob a ação do campo elétrico, movimentam-se no sentido do filamento para a placa acelerados pela força elétrica de sentido contrário ao campo elétrico (fig. 17)

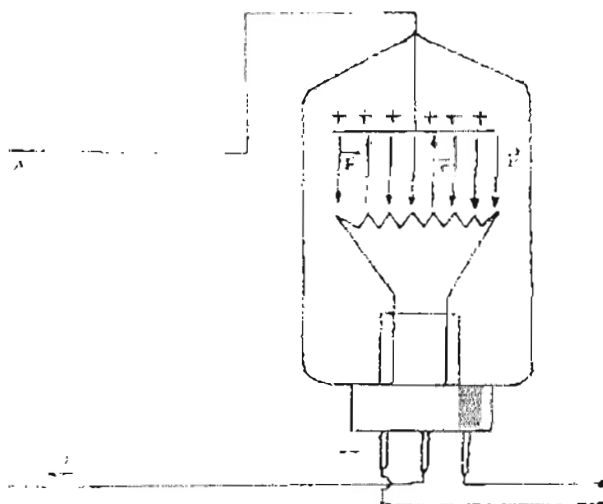


Fig. 17 - Situação em que o campo elétrico permite a passagem de elétrons do catodo aquecido para a placa positiva (GREF 3, 2000)

Quando o sentido do campo elétrico da fonte se inverte, o tipo de carga elétrica que se acumula na placa metálica muda, ocorrendo agora o acúmulo de cargas negativas. Nesse caso, os elétrons que escapam do filamento incandescente ficam sob a ação de uma força elétrica que os movimenta de volta ao filamento. Enquanto o sentido do campo elétrico não se modificar não há corrente no interior da válvula, só haverá corrente no circuito quando o campo elétrico entre os terminais da válvula tiver o sentido indicado na figura 18. A válvula diodo é usada em fontes de tensão elétrica para converter a corrente alternada em corrente contínua

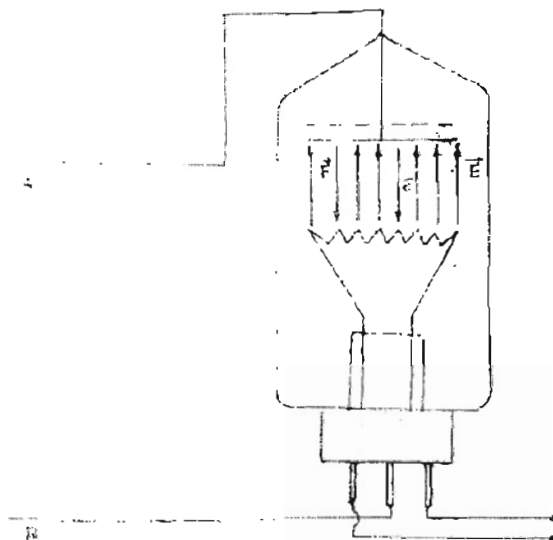


Fig. 18 - Situação onde não há fluxo de corrente elétrica na válvula diodo (GREF 3,2000)

A válvula triodo possui um terceiro elemento em relação à válvula diodo, ou seja, uma grade de arame fino entre o catodo e a placa metálica. A adição da grade de controle permite que esta válvula seja utilizada como um amplificador de sinal.

A figura 19 ilustra os elementos de uma válvula triodo padrão. Note que o catodo está próximo do filamento incandescente e recebe o calor proveniente deste filamento liberando os elétrons através do efeito termoiônico.

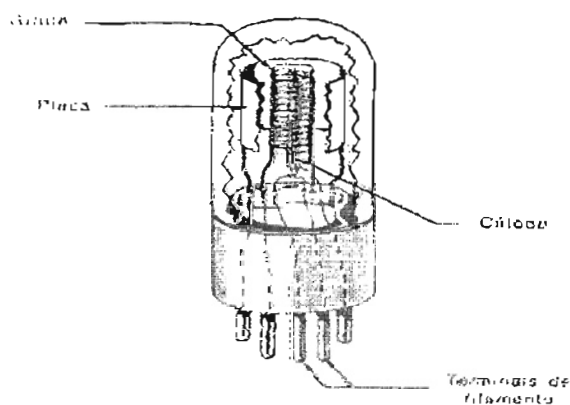
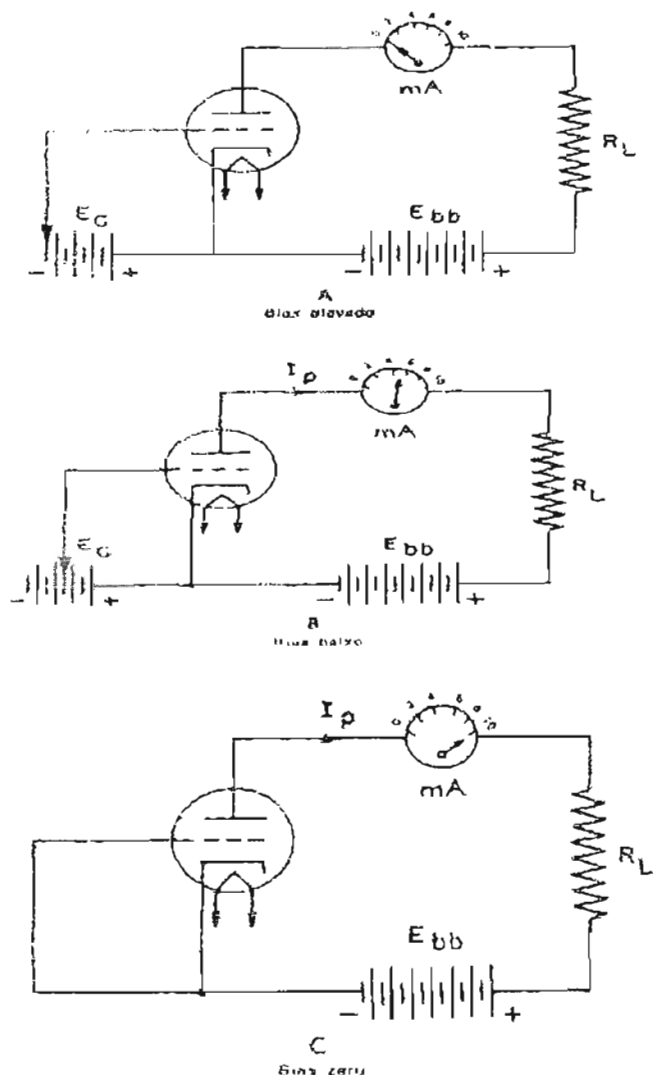


Fig. 19 - Válvula triodo padrão (Gomes, 2000)

Vimos que a corrente de placa em uma válvula diodo depende da voltagem da placa e da temperatura do filamento. Já em uma válvula triodo a

corrente de placa além de depender destes fatores, depende também da voltagem aplicada na grade de controle. Uma pequena variação na voltagem de grade de controle produz uma variação relativamente grande na corrente de placa. A figura 20 ilustra o efeito da voltagem da grade de controle sobre a corrente de placa, ao fazer a voltagem da grade de controle progressivamente menos negativa em relação ao catodo com uma voltagem de corrente contínua que se denomina polarização de grade ou bias.



**Fig. 20 - Efeito da voltagem de grade controle sobre a corrente de placa
(U.S.Navy, 1976)**

Quando o bias negativo é elevado (fig. 20-A), não circula a corrente de placa, pois a carga negativa da grade é suficiente para repelir os elétrons até o catodo; quando diminui o bias (fig. 20-B) passa maior quantidade de elétrons através dos espaços da grade. Com corrente de polarização de grade zero (fig. 20-C) a grade não exerce controle sobre o fluxo de elétrons até a placa e o

triódo atua praticamente como um diodo. Observe que uma pequena variação no sinal de entrada de grade é seguida por uma grande variação no sinal de saída, ou seja, o sinal é amplificado em sua amplitude.

A figura 21 mostra os efeitos da variação do bias em uma válvula triódo quando uma corrente alternada, gerada, por exemplo, por um microfone, é colocada entre a fonte E_c (bias) e a sua grade na figura 2. Quando o bias de operação está no ponto A (-3 volts) na curva característica $i_p \times e_g$, a variação da voltagem de grade encontra-se dentro dos limites da porção linear da curva e a corrente de placa é amplificada devido a diferença de potencial elétrico da fonte E_{bb} ser maior do que a diferença de potencial elétrico da fonte E_c , reproduzindo fielmente a forma de onda da grade. Porém se o bias fixo aumenta até o ponto B (-7 volts) dificulta o fluxo de elétrons do catodo para o anodo, por consequência a amplitude da forma de onda de saída fica consideravelmente distorcida, não ocorrendo a amplificação. O ponto C é o ponto de corte da válvula, nessa situação um amplificador funciona somente como um diodo retificador.

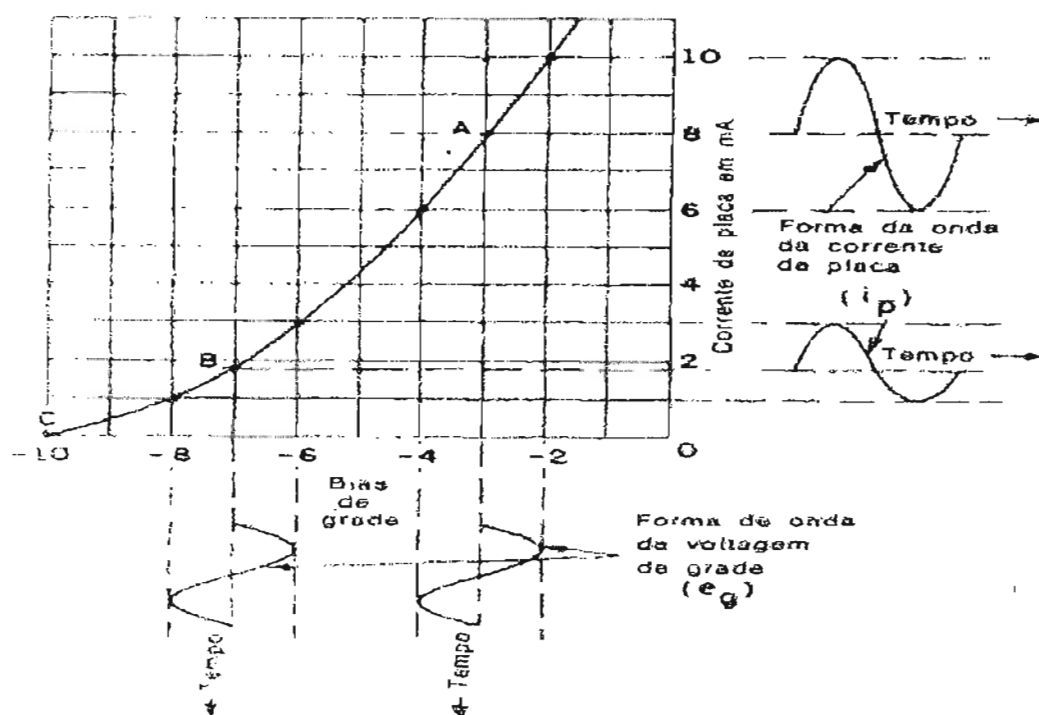


Fig. 21 – Operação de uma válvula triódo sob o efeito de um sinal alternado gerado por um microfone (U.S. Navy, 1976)

3.3.2 - Os semicondutores

Os semicondutores são materiais sólidos que apresentam uma resistividade intermediária em relação à dos condutores e à dos isolantes. Esse comportamento físico se deve ao tipo de ligação química existente entre os átomos. O silício e o germânio são exemplos de semicondutores, cada átomo em sua estrutura cristalina se liga a quatro outros átomos do mesmo elemento. Em cada uma dessas ligações um par de elétrons é compartilhado entre dois átomos através de uma ligação covalente (fig. 22).

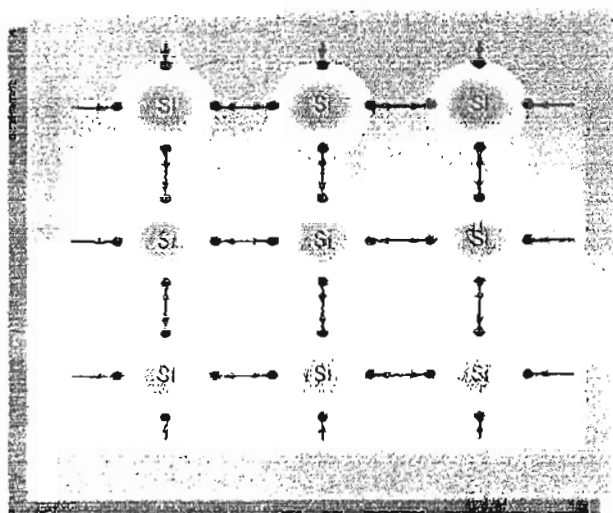


Fig. 22 – Estrutura cristalina de um átomo de silício (Amaldi, 1995)

Diferentemente de um condutor a resistividade de um semicondutor cresce com o aumento da temperatura. A resistividade também pode ser alterada através do acréscimo de impurezas. Num cristal de silício à baixa temperatura todos os elétrons estão ligados aos átomos, os elétrons mais internos de cada átomo orbitam em torno do núcleo, enquanto os quatro mais externos são compartilhados entre dois átomos vizinhos, mantendo-os ligados. Nessa condição o silício é um ótimo isolante. Quando a temperatura aumenta alguns elétrons da ligação se destacam de seu par de átomos e se põem a vagar através do reticulado cristalino. Quanto mais for aquecido o semicondutor, maior será o número desses elétrons livres e a resistividade diminuirá.

Outro modo de diminuir a resistividade consiste em introduzir impurezas, como o arsênio e o boro, no interior da estrutura cristalina do silício formando cristais do tipo n ou p. (Quando são introduzidos átomos de arsênio impureza

negativa) seus elétrons se distribuem uniformemente por todo o cristal de silício. Como o arsênio tende a estabelecer cinco ligações com os átomos vizinhos, mas apenas quatro de seus elétrons são compartilhados com os átomos do silício, o quinto elétron ficará livre para se mover no interior do cristal. Esse elétron funcionará como um transportador de carga negativa. Um cristal assim preparado é chamado semicondutor do tipo n, a letra n indica que a condução se dá pelo movimento de cargas negativas.

Se introduzirmos boro como impureza positiva num cristal de silício seus elétrons tendem a estabelecer apenas três ligações com os átomos vizinhos, sobrarão no cristal um lugar livre para esses elétrons. Esse espaço livre é chamado de lacuna. A lacuna se comporta como se fosse um transportador de carga positiva. Um cristal assim preparado é chamado semicondutor do tipo p (fig. 23).

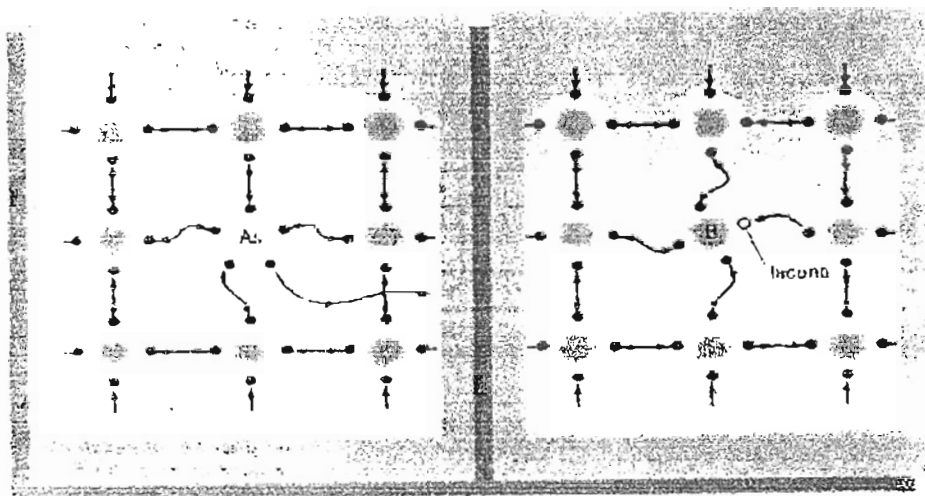


Fig. 23 – Cristal de silício dopado com arsênio(impureza negativa) e boro (impureza positiva). (Amaldi, 1995)

3.3.3 – O transistor

Juntando cristais de tipo n e cristais de tipo p, obtêm-se dispositivos eletrônicos que tanto permitem amplificar a intensidade da corrente como interrompê-la. Por exemplo, se inserirmos um semiconductor p entre dois semicondutores n, como se fosse um sanduíche, obteremos um transistor. O cristal do meio, que precisa ter uma espessura muito pequena (da ordem de 10^{-3} cm), é chamado de base. Os outros dois são o emissor e o coletor (fig. 24).

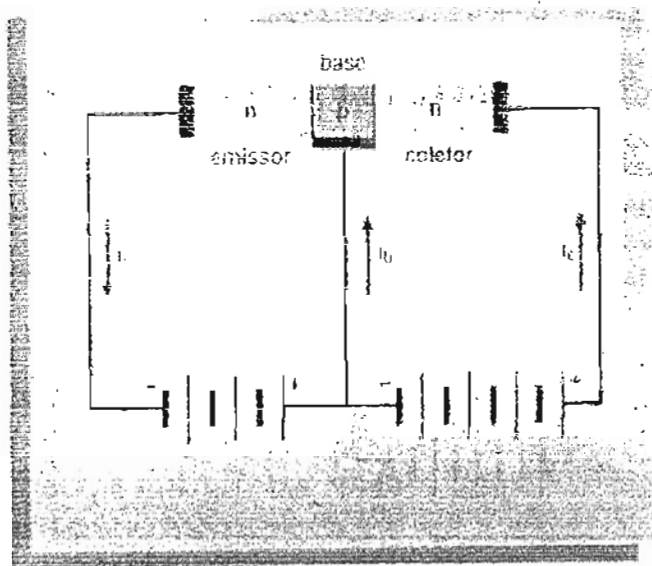


Fig. 24 – Circuito elétrico contendo um transistor do tipo npn, mostrando os fluxos de corrente através da base, coletor e emissor (Amaldi, 1995)

Para entender como transistor funciona, vamos imaginar que o cortamos em duas partes ao longo da camada central (fig. 25). É como se dividíssemos um sanduíche em duas metades, cada uma contendo uma só fatia de pão e uma finíssima película de recheio. Na parte esquerda da figura, a corrente consegue circular. De fato, a base apresenta um potencial mais alto que o do emissor, e o eletrodo positivo ligado à base atrai os elétrons que continuamente chegam ao emissor, provenientes do pólo negativo do gerador. Já na parte direita, não há circulação de corrente. O eletrodo positivo ligado ao coletor tende a atrair os elétrons da base. Nela, porém, praticamente não há elétrons livres, porque o semiconductor que constitui a base é do tipo p e, portanto, contém principalmente lacunas. Sem o fornecimento de cargas livres, a corrente é bloqueada.

O transistor se comporta, portanto, como um amplificador de corrente. Provocando pequeníssimas variações na corrente da base, podemos controlar o fluxo da corrente do coletor, que é muito mais intensa. Um aspecto interessante é que quando i_b é muito pequena, i_c se torna quase igual a zero.

um transistor (Amaldi, 1995)

Fig. 26 – Esquema de ligação elétrica demonstrando o funcionamento de

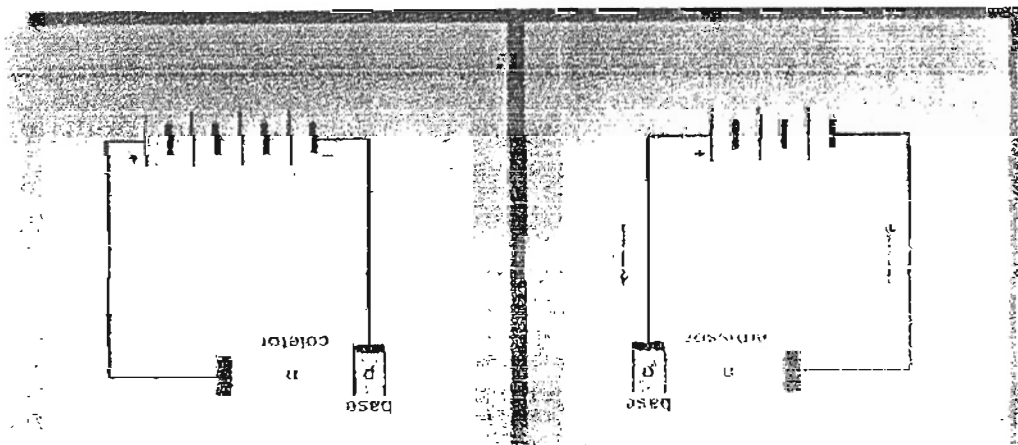


corrente do coletor (fig. 26).

Fazendo variar o potencial da base podemos controlar a intensidade da ordem de grandeza menor que as correntes do coletor (i_c) e do emissor (i_e). Em vez disso, eles formam a corrente da base (i_b), que é algumas elétrons que rumam do emissor para a base, uma pequena parte não alcança o de elétrons é possível porque a espessura da base é muito pequena. Dentre os no coletor, onde passam a ser atraídos pelo eletrodo positivo. Essa migração à base através do emissor prossegue através dela por inércia, penetrando assim passa a circular. A junção permite que a maior parte dos elétrons que chegam Quando unimos as duas metades para formar um transistor, a corrente

pn (Amaldi, 1995)

Fig. 25 – Esquema de ligação elétrica de uma junção np e de uma junção



Em outras palavras, o transistor, nessas condições, se comporta como um diodo. O transistor pode, então, ser considerado um dispositivo que funciona de duas maneiras diferentes, amplificando ou interrompendo uma corrente, de acordo com a intensidade da corrente fornecida à sua base. (Amaldi, 1995)

Os semicondutores são um salto tecnológico e substituíram as válvulas eletrônicas devido a vários fatores, tais como:

- 1º) Peso: os aparelhos antigos eram mais pesados, os atuais são mais leves;
- 2º) Tamanho: sem o uso dos semicondutores um aparelho portátil seria inconcebível;
- 3º) A fonte de alimentação: os aparelhos antigos necessitavam de ser ligados em 110 volts, os aparelhos atuais podem funcionar com pilhas;
- 4º) Tempo para entrar em funcionamento: os aparelhos antigos levavam muito tempo para funcionar, pois precisavam aquecer as válvulas, os aparelhos atuais entram em funcionamento imediatamente;
- 5º) Consumo de energia: os aparelhos antigos consumiam muita energia, porque a válvula necessita de alta tensão, os aparelhos atuais necessitam de pouca energia, porque os semicondutores operam em baixa tensão.

A invenção do transistor data em 1948, provocando uma revolução na radiodifusão com o desenvolvimento dos receptores portáteis. O rádio passou a substituir os jornais como meio de veiculação de notícias, principalmente em países de grande território e população dispersa.

3.4 - O modulador

A figura 27 ilustra graficamente como se origina uma oscilação em amplitude quando se combinam sinais de duas frequências diferentes em uma válvula misturadora.

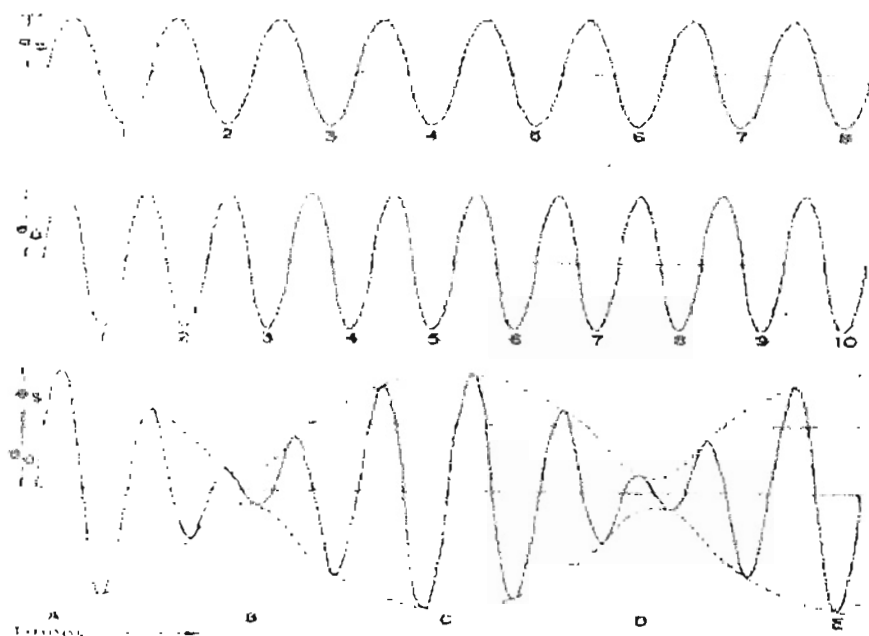
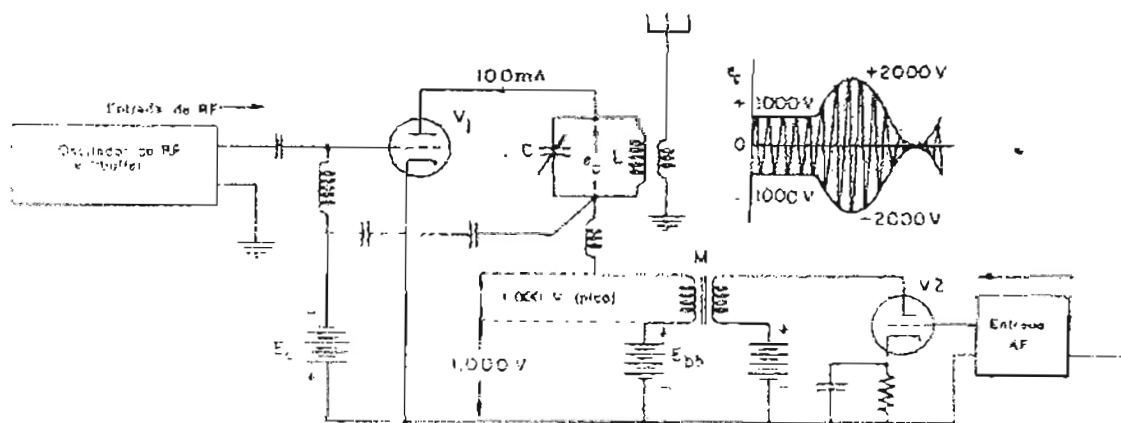


Fig. 27 – Processo de formação de uma onda modulada em amplitude(U.S. Navy, 1976)

Nesta figura uma das tensões e_s possui uma frequência de 8 Hz e a outra e_o possui uma frequência de 10 Hz. Inicialmente, as amplitudes de ambas as tensões somam-se no instante A, mas no instante B a fase relativa de e_o adiantou-se em π radianos reduzindo a amplitude da envolvente a um valor que depende de e_s . No instante C a fase de e_o adiantou-se novamente em π radianos, condição em que as amplitudes se somam de novo.

Consideremos que e_s seja a oscilação gerada por um microfone. Estudamos no tópico 3.1 que esta oscilação em função do tempo é da seguinte forma: $e_s(t) = E_s \cos \omega_s t$, onde E_s é a energia máxima gerada pelo sistema de áudiofrequência e ω_s é a frequência angular própria produzida pelo microfone e, ainda, que e_o seja a oscilação gerada pelo oscilador eletrônico, estudado no tópico 3.2, cuja oscilação em função do tempo é da seguinte forma: $e_o(t) = E_o \cos \omega_o t$, onde E_o é a energia máxima gerada pelo sistema de

A figura 28 ilustra o diagrama elétrico de um modulador projetado para gerar uma oscilação em amplitude modulada (AM).



O oscilador gera uma oscilação elétrica de alta frequência com baixa intensidade. Esta oscilação é amplificada pelo triodo V_1 , cuja corrente elétrica carrega as placas do capacitor C ora positivamente, ora negativamente (fig. 29), produzindo no circuito ressonante LC uma corrente alternada na mesma frequência do oscilador.

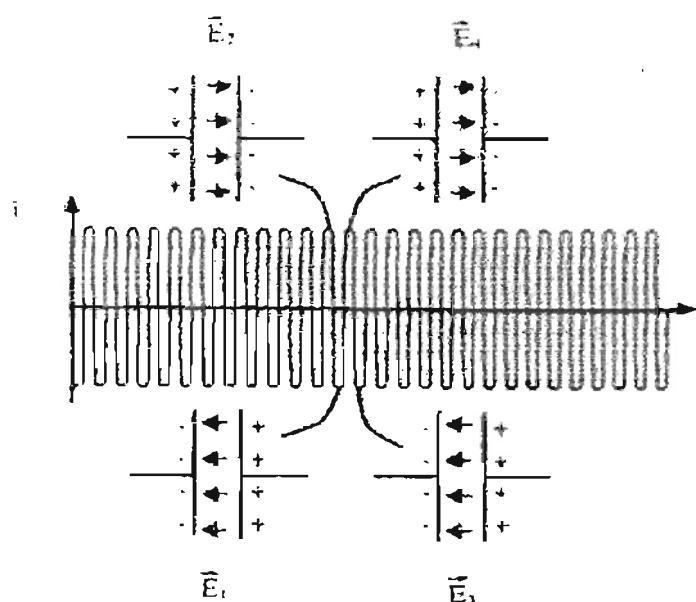


Fig. 29 - Capacitor carregado em quatro instantes distintos sob a influência da corrente elétrica que percorre a válvula V_1 . (GREF 3, 2000)

A seção de audiodfrequência gera uma oscilação de baixa frequência com baixa intensidade. Este sinal é amplificado pelo triodo V_2 e sua corrente elétrica percorre o primário do transformador M . Através da indução eletromagnética é induzida uma corrente na bobina secundária de M . Esta bobina está ligada em série com o circuito ressonante LC, a fim de que sua corrente elétrica produza um campo elétrico de modo a alterar a intensidade do campo elétrico produzido pelo oscilador no capacitor C , gerando desta forma uma oscilação modulada em amplitude, o qual após ser amplificada é emitida pela antena em todas as direções no espaço (fig. 30).

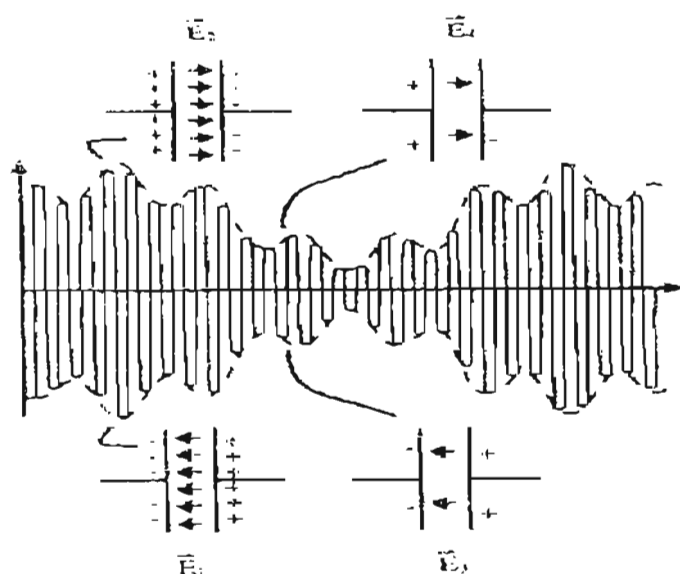


Fig. 30 - Capacitor carregado em quatro instantes distintos sob a influência da corrente elétrica de audiofrequência (GREF 3,2000)

3.5 - Transmissão em frequência modulada (FM)

Iniciada nos Estados Unidos da América no início do século XX, a frequência modulada (FM) é uma modalidade de radiodifusão que exige aparelho receptor mais aperfeiçoado. Neste tipo de transmissão é a frequência do sinal, e não a amplitude, que varia em função do volume sonoro. Embora com alcance limitado em relação aos sinais de AM, as transmissões em FM permitem uma recepção mais nítida. A qualidade deste tipo de transmissão fez com que esta fosse adotada para a transmissão do áudio da TV aberta (canais 2 a 13).

Todo sistema de geração de frequência modulada é semelhante ao de amplitude modulada, exceto que no seu modulador as características da corrente de audiofrequência que representa o som atua alterando a frequência e não a amplitude da onda de radiofrequência, sendo neste caso a amplitude da portadora mantida constante e a frequência sofrendo variações. Graficamente podemos representar esse processo através de superposições das corrente que caracterizam o som da estação, conforme indica a figura 31.

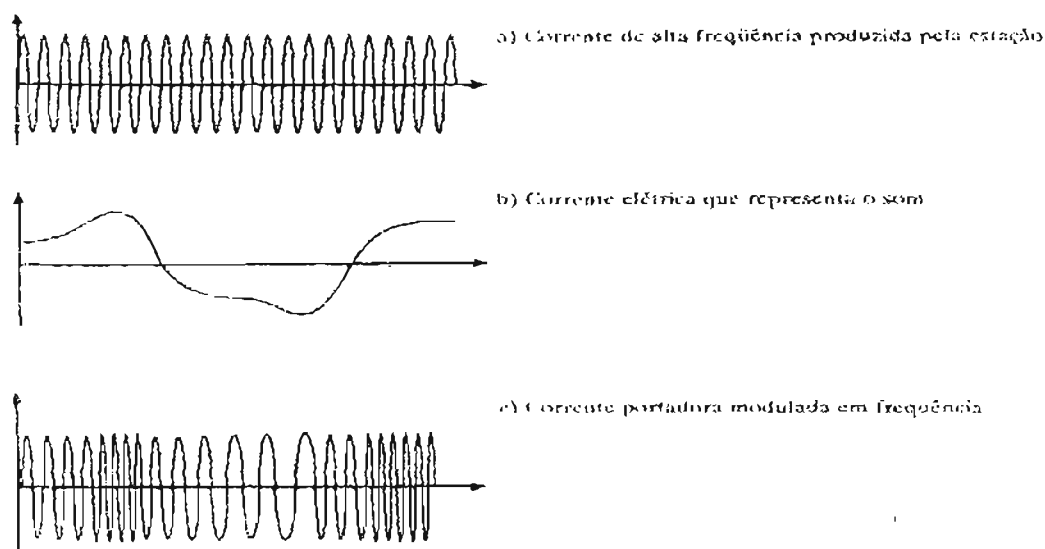


Fig. 31 - Processo de modulação em frequência (FM) (Gaspar 3, 2000)

4 - O resgate da informação: o aparelho receptor

As ondas moduladas em amplitude emitidas pelas diversas estações de rádio, após sofrerem reflexões na atmosfera e na superfície da Terra, são captadas pela antena do receptor de rádio. O receptor tem por função fazer a seleção e demodulação de um dos vários sinais eletromagnéticos gerados por essas estações, resgatando a informação produzida no início do processo pelo microfone. A figura 32 mostra o esquema em bloco de um receptor de ondas de rádio em amplitude modulada (AM). Ele é formado pela antena, pelo amplificador de radiofrequência, pelo detetor, pelo amplificador de áudiofrequência e pelo alto-falante.

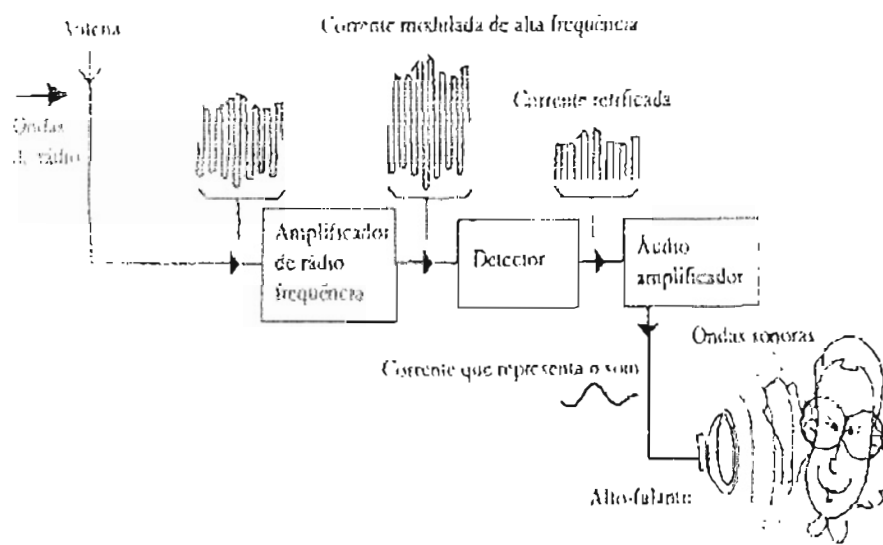


Fig. 32 - Esquema em bloco de um receptor de radio em amplitude modulada (GREF 3, 2000)

O princípio de funcionamento desses amplificadores é semelhante ao estudado no tópico 3.3, sendo utilizado porque a antena receptora normalmente se encontra muito distante só conseguindo captar uma pequena fração dessa energia.

4.2 - O detetor

O detetor possui duas funções básicas: selecionar uma frequência de rádio e demodular essa frequência. A seleção de uma frequência é baseada no fenômeno da ressonância. Para a compreensão deste fenômeno vamos utilizar o seguinte modelo mecânico: pendure numa haste metálica vários pêndulos presos com barbante de comprimentos diferentes: B,C,D e E. Nessa mesma haste pendure outro pêndulo A de comprimento variável (fig. 33). Regule o comprimento de A de maneira que ele se iguale ao comprimento de um dos demais pêndulos, por exemplo, o C. Em seguida, faça o pêndulo A oscilar. Observe que todos os pêndulos se movimentam ligeiramente, mas o pêndulo C tem sua amplitude aumentada e, pouco depois, passa a oscilar com amplitude praticamente igual à de A, condição conhecida como ressonância. Isso ocorre porque o pêndulo A, que é a fonte excitadora, foi sintonizado com o pêndulo C quando igualou-se os comprimentos do barbante de ambos. Note que a frequência dos pêndulos depende apenas do comprimento do barbante, pois a aceleração da gravidade é a mesma para todos.

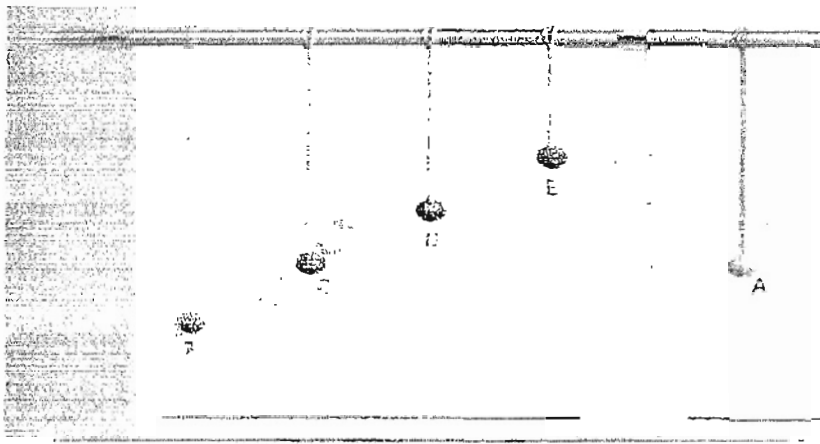


Fig.33 – Modelo mecânico para demonstrar o fenômeno da ressonância

Qualquer oscilador, seja mecânico ou eletromagnético, quando submetido a uma ação externa sempre irá oscilar na frequência f do agente externo e a relação entre a frequência f e a frequência natural f_0 determinará a amplitude das oscilações. Quando a frequência do agente externo é igual à frequência natural do oscilador, a amplitude de velocidade para um oscilador mecânico ou de corrente para um oscilador elétrico, pode atingir valores altíssimos dependendo da resistência do sistema. Quanto menor for a resistência do oscilador, maior o pico de oscilação da curva. Observe no eixo da abscissa, na figura 34, que a amplitude é máxima quando $f/f_0 = 1$, ou seja, quando a condição de ressonância é estabelecida. É exatamente desta forma que ocorre quando é sintonizada uma estação de rádio ou televisão em um detetor.

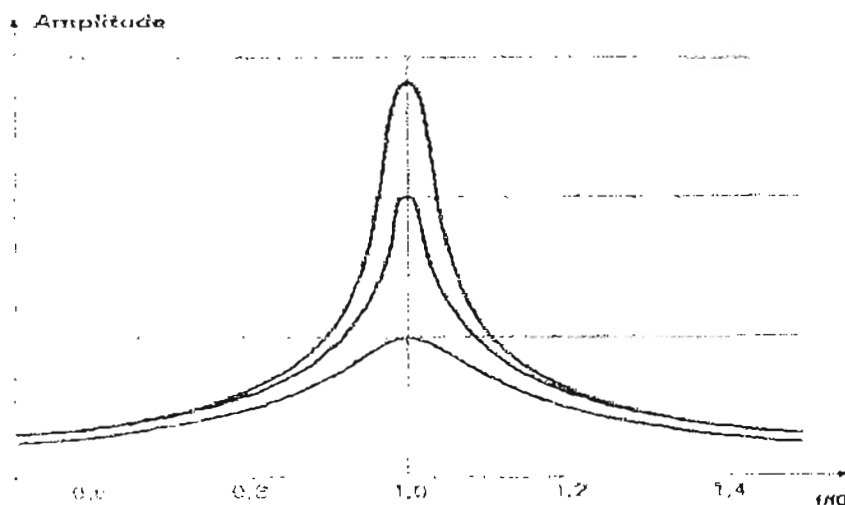


Fig.34 – Representação gráfica da curva de ressonância (Gaspar 3, 2000)

A figura 35 ilustra o diagrama elétrico de um receptor de rádio. A etapa seletora de frequência inicia no primário do transformador T_1 até a válvula eletrônica V_2 . Quando as ondas eletromagnéticas emitidas pelas várias estações de rádio atingem a antena do receptor, as componentes dos campos magnéticos excitam os elétrons da antena induzindo vários campos elétricos variáveis nas mesmas frequências de oscilações dessas ondas. Esses campos elétricos induzem uma corrente elétrica alternada no circuito ressonante ligado à T_1 que serve para controlar a grade da válvula eletrônica V_1 . Essa válvula amplifica o sinal e aplica no circuito ressonante ligado à T_2 . Este sinal é utilizado para controlar a válvula eletrônica V_2 , cuja função é misturar este sinal recebido com o sinal elétrico gerado pelo oscilador interno do rádio. Quando acionamos o botão do sintonizador, o qual está unido a um eixo aos capacitores variáveis dos circuitos ressonantes, fazemos com que a frequência angular do oscilador do rádio (ω_0) se torne igual à frequência angular de uma estação desejada (ω). Nesta condição de ressonância a estação de rádio é selecionada.

A demodulação é processo pelo qual se separa o sinal de radiofrequência do sinal de audiofrequência, recuperando a informação. A etapa demoduladora inicia no primário do transformador T_3 até a válvula eletrônica V_4 . Essa válvula é um diodo que tem um ponto de transição rápida entre a condução e não condução, tornando-se desta forma um bom detetor.

A corrente elétrica do sinal selecionado circula através de V_4 apenas quando a placa é positiva em relação ao catodo, isto é, apenas durante os meios ciclos positivos da voltagem de radiofrequência (RF). O sinal retificado que circula pelo diodo consiste numa série de pulsos de RF e não numa linha envolvente continua. Por esta razão se utiliza um capacitor como filtro para que a tensão de saída se aproxime do valor de pico do potencial aplicado de RF e reproduza a modulação de audiofrequência, o qual é aplicado no alto-falante.

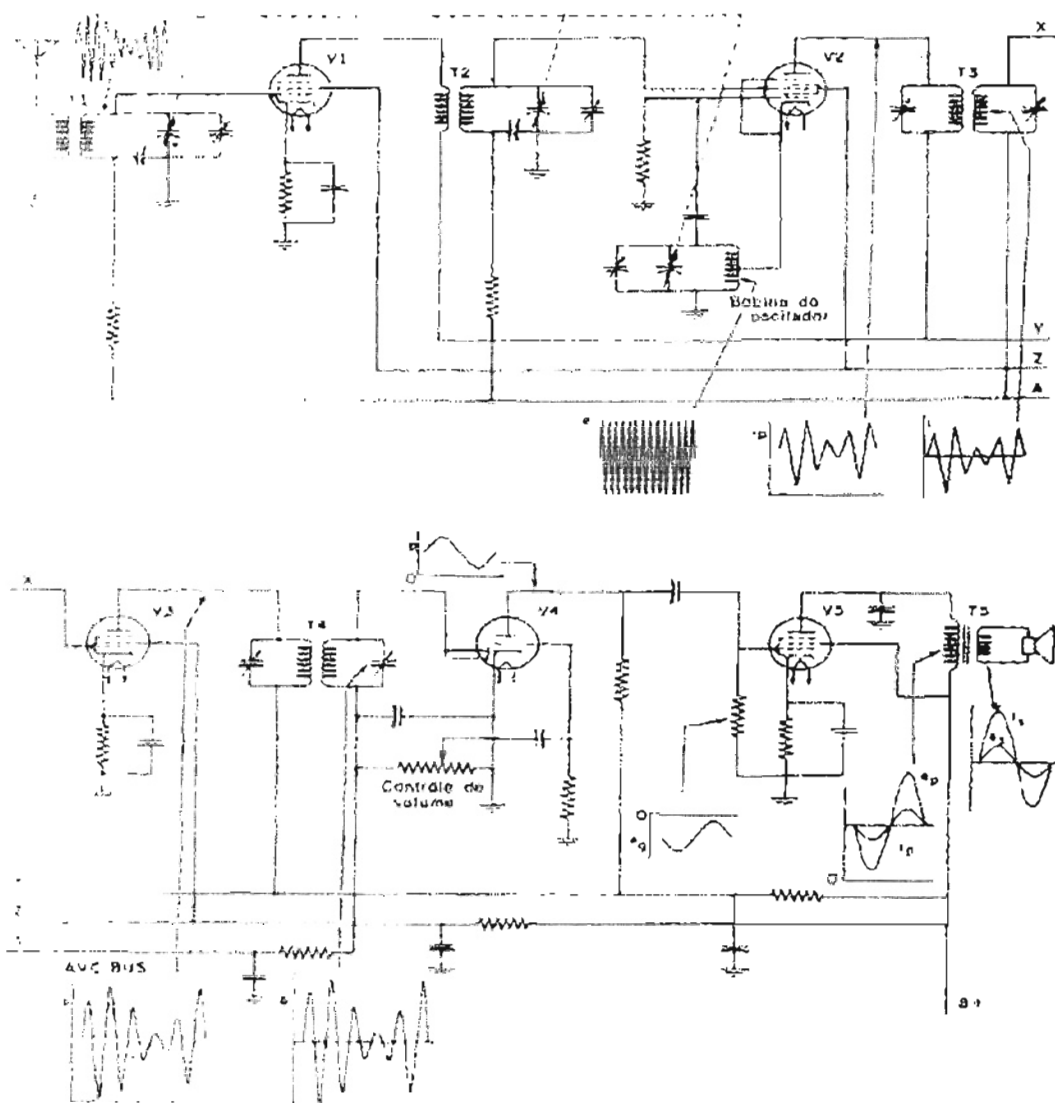


Fig. 35 - Diagrama elétrico de um receptor de rádio (U.S. Navy, 1976)

4.3 - O alto-falante

Os primeiros alto-falantes surgiram entre 1924 e 1925, como equipamento capaz de ampliar o som produzido pelos fonógrafos elétricos primitivos. Os diminutos movimentos comunicados à agulha, quando de sua passagem pelo sulco do disco, eram transformados em sinais elétricos que precisavam ser reconvertidos em vibrações mecânicas. E essa função não podia ser exercida por cornetas acústicas dos fonógrafos mecânicos. Surgiu, assim, o alto-falante de bobina móvel (fig. 36), desenvolvido pelos norte-americanos. A simplicidade de sua construção e a boa qualidade de reprodução sonora possibilitadas pelo novo dispositivo fizeram com que ele permanecesse praticamente inalterado até hoje.

Esse tipo de alto-falante consiste basicamente de um cone (o diafragma) circular ou elíptico de pouco peso, geralmente de papelão e de um conjunto de bobina e ímã. O diafragma fica preso no chassi de metal por meio de um sistema de suspensão localizado ao redor de sua borda externa. Na parte central do cone fica a bobina, posicionada entre os pólos de um ímã permanente e mantida nessa posição por uma segunda suspensão chamada "aranha". Ao enrolamento da bobina ligam-se os fios de saída do amplificador. Quando sinais elétricos provenientes do amplificador passam pela bobina, produzem nela um campo magnético que varia de acordo com as vibrações de sinais. Como a bobina está sob a influência magnética do ímã permanente, ela passa a vibrar, fazendo vibrar também o cone. A vibração transmite-se ao ar sob forma de ondas sonoras. Assim, o som produzido pelo alto-falante é a turbulência ritmada do ar provocada pela vibração do diafragma. O alto-falante atua de modo inverso ao microfone, ele transforma a energia elétrica de baixa frequência do sinal de áudio em energia mecânica sonora.

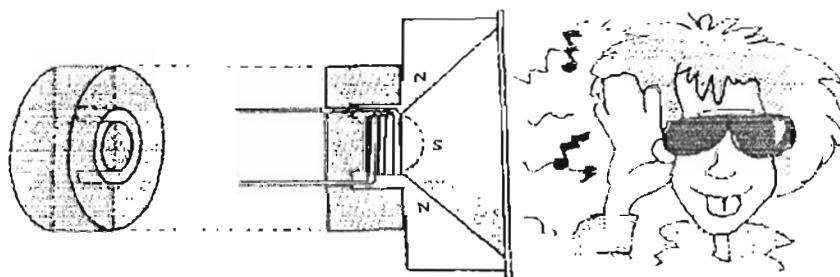


Fig. 36 – O alto-falante de bobina móvel (GREF 3, 2000)

original, os novos projetos passaram a considerar formas de superar os problemas causados pelo sistema de bobina móvel. Foi necessário cuidar para que o som gerado na superfície frontal do cone fosse isolado do emitido pela superfície posterior, caso contrário as ondas sonoras se cancelavam, prejudicando a reprodução dos sons graves. Para melhorar a reprodução o alto-falante passou a ser montado em uma caixa acústica. Trata-se de uma caixa selada, revestida internamente com isolantes acústicos, de modo que a emissão sonora da superfície posterior do cone ficasse perfeitamente controlada. As caixas desse tipo requerem maior potência do amplificador, mas oferecem melhor resposta em baixa frequência. As caixas acústicas de alta qualidade possuem sempre mais de um alto-falante, para cobrir melhor toda faixa de frequências audíveis. As unidades pequenas (tweeters) são responsáveis pela faixa de frequência dos sons agudos. Além do tweeters, a caixa deve possuir um alto-falante de baixa frequência (woofer) cobrindo a faixa de frequência que vai de aproximadamente 300 a 500 Hz e uma unidade de frequência intermediária, operando entre 500 e 4000 Hz. Num equipamento desse tipo, o sinal que chega aos alto-falantes passa antes por um circuito divisor de frequências (uma espécie de filtro elétrico), que distribui o espectro sonoro adequadamente entre as diversas unidades.

4.3.1- Nível de intensidade β

Quando a potência emitida por uma fonte sonora é constante, defini-se o conceito de intensidade sonora (I) pela razão entre a potência (P) emitida pela fonte sonora e a área que a onda atravessa (ΔS). Sua unidade, no SI, é watt por metro quadrado (W/m^2). Matematicamente: $I = P/\Delta S$.

Entretanto, o nosso ouvido não detecta de forma linear a intensidade sonora transmitida. Para determinada frequência se a intensidade do som que ouvimos torna-se dez vezes maior, a nossa sensação auditiva é aumentada em média apenas duas vezes. Por esta razão, define-se outra grandeza relacionada à intensidade sonora, voltada especificamente ao ser humano conhecida como nível de intensidade sonora β . A definição matemática dessa grandeza e da unidade correspondente é baseada em padrões fisiológicos médios. Portanto, admite-se que a intensidade sonora média percebida pelo ser humano seja $I_0 = 10^{-12} W/m^2$ para a frequência de 1000Hz e o nível de intensidade β varie em escala logarítmica de base 10. Matematicamente, podemos definir o nível de intensidade β da seguinte forma:

$$\beta = 10 \log (I / I_0)$$

Sua unidade do SI é o decibel (dB), em homenagem a Alexander Graham Bell.

A figura 37 ilustra o gráfico que mostra as regiões em que o ouvido humano é capaz de ouvir sons. Ele apresenta o nível de intensidade em decibéis no eixo das ordenadas e a frequência do som emitido ou percebido no eixo das abcissas. Trata-se do gráfico de audibilidade média do ouvido humano, por meio dele pode-se notar, por exemplo, que o limiar da dor está na faixa de 120 dB para qualquer frequência sonora audível, já o nível mínimo do limiar da audição situa-se pouco abaixo de zero dB para frequência entre 1000 a 5000 Hz.

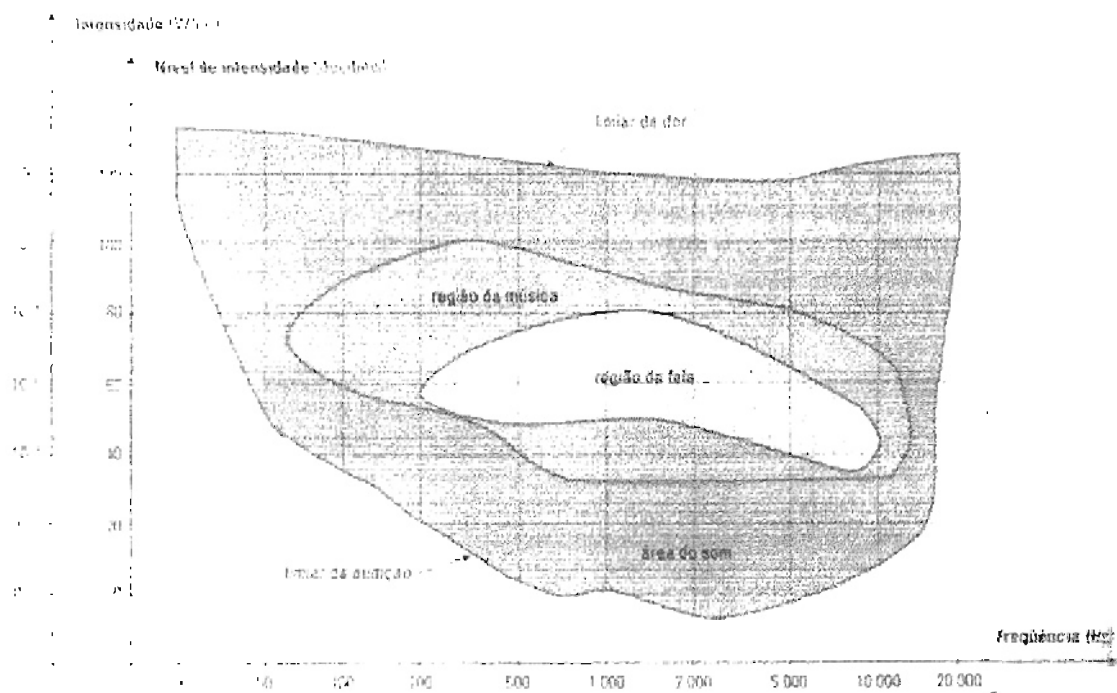


Fig. 37 - Gráfico de audibilidade humana (Gaspar 2,2003)

5 - Conclusão

Baseando-se na estratégia utilizada por um livro paradidático, este trabalho reuniu temas abordados separadamente em Mecânica, Eletricidade, Eletromagnetismo e Física Ondulatória aplicados em um transmissor e receptor de ondas de rádio, buscando fazer a correlação desses conceitos com a tecnologia utilizada por nossa sociedade, com o objetivo de consolidar esses conceitos e, também, como uma fonte auxiliar para compreensão dos fenômenos envolvidos na telecomunicação.

Uma estação de transmissão se compõe de elementos ativos como o microfone, o oscilador eletrônico, o modulador e o amplificador de sinal. Ao analisar o funcionamento de um microfone é discutido o efeito piezoelétrico em cristais de quartzo e como uma onda sonora é transformada em oscilação elétrica. Ao analisar um oscilador eletrônico pode-se estudar os conceitos de massa inercial, força de restauração, frequência angular e o significado físico de indutância e capacitância. Com o modulador é observado que o Princípio de superposição de onda não é um fenômeno exclusivo da mecânica, este fenômeno é imprescindível na geração de um sinal elétrico em amplitude modulada. Através do amplificador de sinais é analisado o efeito termoiônico em uma válvula eletrônica e o efeito de junção pn em um transistor para a amplificação de uma oscilação elétrica. Com o detetor em um receptor de rádio pode-se estudar o fenômeno de ressonância, mostrando sua utilização para selecionar uma estação transmissora, além de mostrar como é recuperado o sinal de áudiofrequência em uma onda de rádio. Com o alto-falante é analisado como um sinal elétrico é transformado em onda sonora.

6 – Bibliografia

- 1) Hallyday, David; Resnick, Robert. Fundamentos da Física 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1991.
- 2) Hallyday, David; Resnick, Robert. Fundamentos da Física 3: Eletromagnetismo. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1991.
- 3) Guimarães, Luiz Alberto; Fonte Boa, Marcelo. Física III: Eletricidade e Ondas. 2ª edição, Editora Futura, 2004.
- 4) Gaspar, Alberto. Física 3: Eletromagnetismo e Física Moderna. 1ª edição, Editora Ática, 2000.
- 5) Gaspar, Alberto. Física 2: Ondas, Óptica e Termodinâmica. 1ª edição, Editora Ática, 2000.
- 6) Amaldi, Ugo. Imagens da Física. Editora Scipione, 1995.
- 7) GREF. Física 3: Eletromagnetismo. 4ª edição, Editora da Universidade de São Paulo, 2000.
- 8) Gomes, Alcides Tadeu. Telecomunicações AM-FM. 16ª edição, Editora Érica, 2000.
- 9) U.S. Navy, Bureau of Naval Personnel, Training. Curso de eletrônica. Hemus Lvraria Editora Ltda, 1976.
- 10) Ministério da Educação/ Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio, Brasília, 1999.
- 11) pt.wikipedia.org/wiki/telecomunica